

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 4

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.23.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ БУРОВОГО ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

Д. И. Симисинов¹, Л. В. Городилов², А. Д. Симисинов¹

¹*Уральский государственный горный университет,
E-mail: 7sinov@mail.ru, ул. Куйбышева, 30, 620144, г. Екатеринбург, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Решена задача по выявлению и сопоставлению внутренних и внешних параметров, образующих замкнутый многозвездочный контур (размерную цепь) бурового шарошечного инструмента. Представлены методики вероятностного расчета размерной цепи диаметра инструмента, расчета погрешности диаметра инструмента вследствие поворота шарошек на опорах, расчета погрешности радиального бieniaия калибрующих конусов шарошек долота относительно оси резьбы ниппеля для трех- и четырехшарошечного долота. Даны рекомендации по пересмотру допусков на выходные геометрические параметры шарошечного инструмента и введению изменений в нормативно-техническую документацию.

Буровой шарошечный инструмент, шарошечное долото, размерная цепь, погрешность изготавления, методика расчета погрешности

DOI: 10.15372/FTPRPI20240409

EDN: SCLESF

В горном деле бурение шарошечными долотами используется при буровзрывных работах на карьерах. Отмечается тенденция увеличения объемов труднобуримых и скальных горных пород, неоднородности, трещиноватости и обводненности породных массивов. Соответственно увеличивается доля применяемых станков шарошечного бурения, ударно-вращательного и комбинированного действия [1]. На долю шарошечного бурения в мире приходится 82.5 % всех объемов бурения, на вращательный способ — 15.7 %, на ударно-вращательный — 1.0 %, на термический и ударно-канатный способы — 0.8 % [2]. В России развитие ударно-вращательного бурения сдерживается отсутствием передвижных компрессоров высокого давления и устаревшей компоновкой буровых станков [3, 4].

Буровой шарошечный инструмент представлен шарошечными долотами, а также различного назначения расширителями и разбуривателями. Его основной элемент — шарошка, оснащенная породоразрушающими зубьями и установленная на многорядной подшипниковой опоре.

В современных условиях потребность в шарошечном буровом инструменте достаточно велика [5, 6]. Стоимость 1 п. м бурения в некоторых случаях доходит до 5 тыс. долл. за 1 м, а стоимость эксплуатации современных буровых установок может превышать 400 тыс. долл./сут [7, 8]. Улучшение показателей работы бурового шарошечного инструмента позволяет сократить расходы на буровзрывные работы и получить соответствующий экономический эффект.

Для обеспечения износостойкости породоразрушающих и триботехнических элементов, интенсивно истирающихся поверхностей используется термохимическое воздействие: цементация; закалка; высокий отпуск; вторичная закалка; низкий отпуск; наплавка твердыми сплавами. Обеспечение точности изготовления бурового шарошечного инструмента определяет заданные показатели работы инструмента и его конкурентоспособность. В шарошечном долоте различают четыре основных показателя точности: диаметр долота; разновысотность шарошек; радиальное биение шарошек относительно оси резьбы; радиальное биение зубьев шарошек относительно оси центра [5]. Эти показатели регламентируются техническими условиями и закладываются из расчета многозвездных размерных цепей. Одна из важнейших задач — выявление и сопоставление внутренних и внешних связей шарошечного долота, образующих замкнутый многозвездный контур (размерную цепь).

Изучению размерных цепей буровых шарошечных долот посвящено немногого работ [9–13]. В [14] рассчитан диаметр шарошечного бурового долота через положение крайних точек обратного конуса шарошек, образующих линию калибровки, вписываемую в круг, создаваемый вращением радиуса долота. В [15] установлено существенное снижение ресурса подшипников долота, элементов вооружения шарошек и, соответственно, проходки на долото с увеличением разновысотности шарошек. Одна из причин снижения стойкости опор и вооружения шарошек — неравномерное распределение осевой нагрузки по секциям. При неблагоприятном сочетании взаимного положения шарошек, даже в пределах допуска на разновысотность, осевая нагрузка, действующая на одну шарошку, может изменяться приблизительно в 2 раза.

Результаты расчетно-аналитического и экспериментального методов определения загруженности рабочих элементов вооружения шарошечных долот, полученные даже при нулевой или близкой к нулю разновысотности шарошек, показали значительную перегруженность отдельных секций долота [16].

В [17] изучено повышение точности сборки секций долот. Замена базовых штифтовых отверстий, расположенных на разных плоскостях в пространстве с зазорами по базовым штифтам на плоскую поверхность, позволяет значительно повысить уровень точности сборки секций, а значит, и ресурс долота. В [18] приводятся результаты исследований и экспериментов по изготовлению и сборке шарошечных долот с кратно уменьшенными допусками на радиальное, торцевое биение шарошек и на диаметр долота.

В настоящей работе представлен ряд методик, направленных на разработку конкретных предложений по повышению точности основных выходных параметров бурового шарошечного инструмента согласно ГОСТ 20692-2003 “Долота шарошечные: диаметры инструмента и радиального биения шарошек относительно оси резьбы”.

РАСЧЕТ РАЗМЕРНОЙ ЦЕПИ ДИАМЕТРА ШАРОШЕЧНОГО ИНСТРУМЕНТА

Расчет размерной цепи диаметра шарошечного инструмента основан на методе теории вероятности. Методика распространяется на буровые шарошечные долота и разбуриватели, оснащенные тремя и более шарошками. Размерная цепь диаметра шарошечного разбуривателя показана на рис. 1. В качестве замыкающего звена принял радиус-вектор одной шарошки.

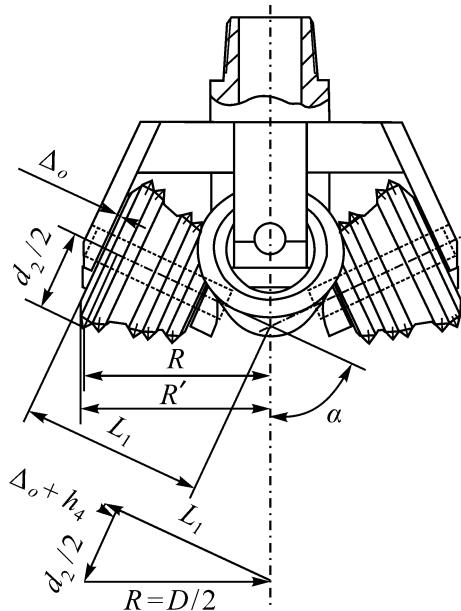


Рис. 1. Размерная цепь диаметра бурового шарошечного инструмента

Уравнение зависимости радиус-вектора окружности шарошки от составляющих звеньев имеет вид

$$R = [L_1 - (h_4 + \Delta_o)] \sin \alpha + \frac{d_2}{2} \cos \alpha, \quad (1)$$

где L_1 — расстояние от точки пересечения оси цапфы секции с осью шарошки до бурта цапфы; h_4 — расстояние от плоскости максимального диаметра шарошки до торца ее выточки, смежного с буртом подшипника цапфы шарошки; Δ_o — осевой люфт между буртом цапфы и торцом выточки шарошки (принят выбранным внутрь оси забоя); α — угол между осями цапфы и разбуривателя; d_2 — максимальный диаметр шарошки; $R = D/2$ — радиус-вектор окружности разбуривателя.

В (1) параметры L_1 , α , Δ_o , d_2 заданы чертежами, а h_4 является замыкающим размерной цепи в шарошке:

$$h_4 = h_1 + h_3 - h_2. \quad (2)$$

Здесь h_1 — расстояние от торца А шарошки до торца выточки, смежного с буртом цапфы секции; h_2 — полная высота шарошки; $h_3 = 1/2(d_2 - d_1)\operatorname{tg}\varphi$ — расстояние от торца Б шарошки до плоскости ее максимального диаметра d_2 ; d_1 — диаметр торца Б шарошки; φ — угол наклона калибрующего конуса шарошки к торцу Б. Схема размерной цепи показана на рис. 2.

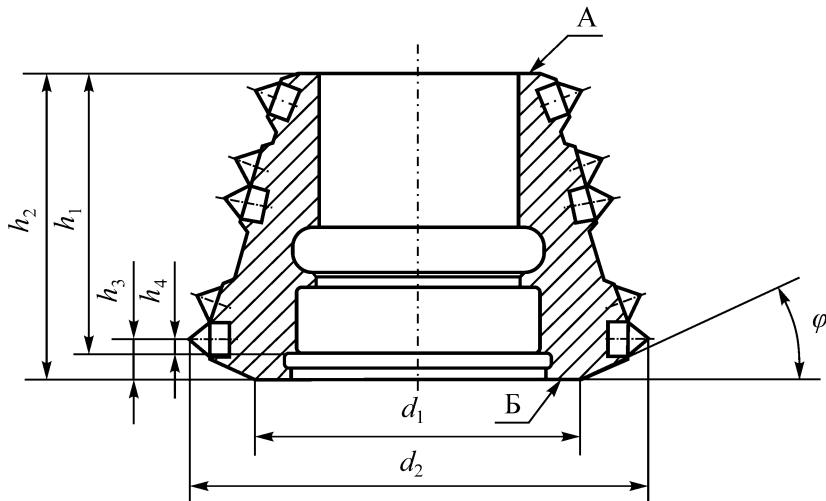


Рис. 2. Размерные цепи шаровки

В развернутом виде уравнение (2) имеет вид

$$h_4 = h_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1)\operatorname{tg}\varphi - h_2.$$

Вычислим статистические характеристики рассеивания размера h_3 . Для этого решим частные производные этой функции по размерам d_1 , d_2 , φ :

$$\frac{\partial h_3}{\partial d_1} = -\frac{\operatorname{tg}\varphi}{2}, \quad \frac{\partial h_3}{\partial d_2} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{2}, \quad \frac{\partial h_3}{\partial \varphi} = \frac{d_2 - d_1}{2\cos^2\varphi}.$$

Максимальный интервал рассеивания размера h_3 определяется суммой отклонений:

$$\Delta h_3 = \sum \left(\frac{\partial h_3}{\partial d_1} \Delta d_1 + \frac{\partial h_3}{\partial d_2} \Delta d_2 + \frac{\partial h_3}{\partial \varphi} \Delta \varphi \right).$$

По полученному Δh_3 вычисляются максимальное поле рассеивания $\sum \Delta h_3$ с учетом верхнего и нижнего отклонений размера, середина поля \bar{h}_3 , номинал размера h_3 , а также координаты центра рассеивания ($\bar{h}_3 = h_3 + \Delta h_3$).

Вероятное поле рассеивания размера (при коэффициентах относительного рассеивания замыкающего размера h_3 и составляющих, равных единице, и при отсутствии корреляции между размерами) определяется

$$\delta h_3 = \sqrt{\sum \left[\left(\frac{\partial h_3}{\partial d_1} \Delta d_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial h_3}{\partial d_2} \Delta d_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial h_3}{\partial \varphi} \Delta \varphi \right)^2 \right]}.$$

Вероятное поле рассеивания размера h_4 :

$$\delta h_4 = \sqrt{\sum (\Delta h_1^2 + \Delta h_2^2 + \Delta h_3^2)}.$$

По полученному значению Δh_3 в соответствии с (2) вычисляется координата центра рассеивания \bar{h}_4 . Далее находится максимальный интервал рассеивания размера h_4 :

$$\Delta h_4 = \Delta h_1 + \Delta h_3 - \Delta h_2,$$

по которому рассчитывается общее поле $\sum \Delta h_i$.

Частные производные из (1):

$$\frac{\partial R}{\partial l_1} = \sin \alpha, \quad \frac{\partial R}{\partial h_4} = -\sin \alpha = \frac{\partial R}{\partial \Delta_o},$$

$$\frac{\partial R}{\partial a} = [l_1 - (h_4 + \Delta_o)] \cos \alpha - \frac{d_2}{2} \sin \alpha,$$

$$\frac{\partial R}{\partial d_2} = \frac{\cos \alpha}{2}.$$

Вероятное поле рассеивания радиуса окружности шарошки равно

$$\Delta R = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial R}{\partial l_1} \Delta l_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial h_4} \Delta h_4 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \Delta_o} \Delta_o \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial d_2} \Delta d_2 \right)^2 \right]}.$$

Отсюда вероятное поле рассеивания диаметра шарошечного инструмента $\Delta D = 2\Delta R$ (рис. 3).

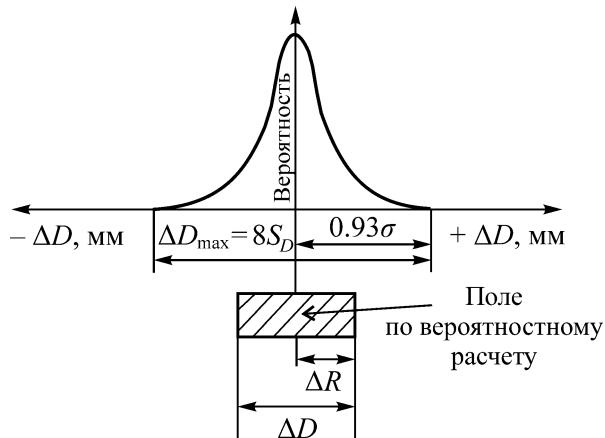


Рис. 3. Распределение полей рассеивания диаметра шарошки по вероятностному расчету

Вероятность попадания в рассчитанное поле при совмещении его центра с центром поля максимального поля рассеивания диаметром ΔD_{\max} определяется следующим образом. Задается $D_{\max} = 8S_D$ (S_D — среднеквадратическое отклонение от центра рассеиваний, $\pm 4S_D$ — соответствует вероятности $\alpha = 0.9999 \approx 1$). Вероятность попадания в поле ΔD равна

$$\alpha = 2\Phi\left(\frac{\Delta R}{1/8D_{\max}}\right),$$

где Φ — интеграл вероятностей нормальной случайной величины.

Методика позволяет рассчитывать по вероятностным формулам основные геометрические параметры бурового шарошечного инструмента, включая поле диаметра ΔD с оценкой вероятности до 100 %.

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ДИАМЕТРА ДОЛОТА ВСЛЕДСТВИЕ ПОВОРОТА ШАРОШЕК НА ОПОРАХ

Сущность явления, когда при повороте шарошек на опорах возникает погрешность номинального диаметра долота, объясняется следующими причинами. При наличии зубьев на периферийных конусах шарошек, прорезанных на тыльных калибрующих конусах, и при разных вариантах сочетания углов поворота шарошек на опорах возможны различные комбинации положения калибрующей точки на каждой шарошке относительно зубьев. Крайними из этих положений, разница между которыми связана с погрешностью диаметра долота, являются:

- калибрующие точки каждой шарошки совпадают с вершинами зубьев, что соответствует максимальному диаметру D_{\max} ;
- калибрующие точки каждой шарошки размещены в промежутке между вершинами зубьев и симметрично им, что соответствует минимальному диаметру D_{\min} .

Все другие положения калибрующих точек относительно зубьев промежуточные относительно этих двух положений, и данное явление встречается во всех плоскостях, пересекающих тыльные конусы шарошек и перпендикулярных оси шарошечного инструмента. Схема расчета погрешности диаметра трехшарошечного долота приведена на рис. 4.

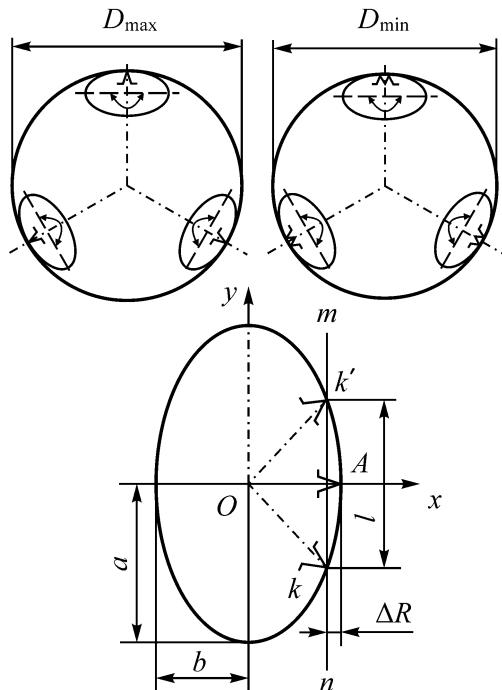


Рис. 4. Расчет погрешности диаметра долота от поворота шарошек на опоре и несовпадения зубьев на тыльных конусах с калибрующими точками

Погрешность радиуса калибрующей окружности ΔR определяется как “стрелка” между прямой mn , проходящей через вершины двух зубьев (при калибрующей точке посередине между ними — второе крайнее положение) и точкой A на эллипсе, с которой совпадает вершина зуба (первое крайнее положение). Эллипс является проекцией шарошки долота на плоскость, перпендикулярную ее оси. Для нахождения ΔR составляются уравнения:

$$\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1, \quad (3)$$

$$x = b - \Delta R. \quad (4)$$

Здесь (3) определяет указанный эллипс, (4) — прямую mn ; $a = d_2 / 2$ — большая полуось эллипса или радиус окружности шарошки (по точке пересечения периферийного конуса с тыльным); $b = a \cos \alpha$ — малая полуось эллипса; α — угол между осями долота и опоры шарошки.

Из решения (3) и (4) имеем координату y точек k (k') пересечения прямой mn с эллипсом:

$$y = y_k = \frac{l}{2} = \sqrt{a^2 - \left(\frac{a}{b}\right)^2 (b - \Delta R)^2}.$$

В этом уравнении хорда эллипса l находится через координату y точек k (k') и определяется зависимостью

$$\sin\left(\frac{360}{2z}\right) = \frac{l}{2},$$

где z — число зубьев шарошки; $360 / z$ — центральный угол между вершинами двух смежных зубьев. Отсюда

$$\Delta R = b - \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - \frac{l^2}{4}}$$

и после подстановки a, b, L :

$$\Delta R = \frac{d}{2} \cos \alpha \left[1 - \cos\left(\frac{360}{2z}\right) \right]. \quad (5)$$

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ КАЛИБРУЮЩИХ КОНУСОВ ШАРОШЕК ДОЛОТА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ РЕЗЬБЫ НИППЕЛЯ (ДЛЯ ТРЕХШАРОШЕЧНОГО ДОЛОТА)

Погрешность радиального биения рассчитывалась на основе наличия неравенства трех калибрующих радиусов-векторов в одном шарошечном инструменте. Из-за неравенства радиусов-векторов при разных поворотах шарошек на опорах использовалась расчетная схема биения для случая трехшарошечного инструмента (рис. 5).

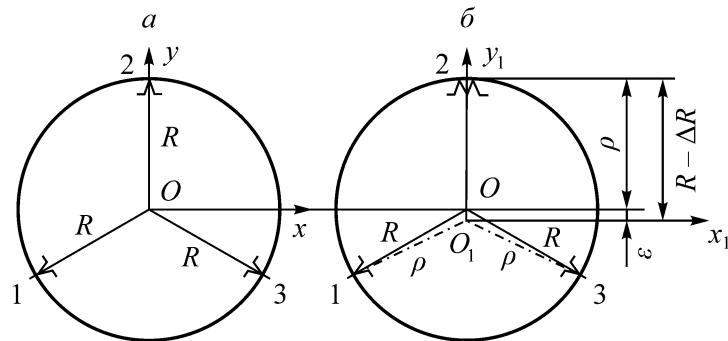


Рис. 5. Образование радиального биения

Вторая шарошка повернута так, что калибрующая точка 2 расположена между зубьями, а для первой и третьей шарошек зуб совпадает с калибрующей точкой. При этом $R_1 = R_3 = R$, $R_2 = R_3 - \Delta R$ (ΔR определена по (5)). Первоначальный центр O окружности долота (рис. 5a) смещается на эксцентриситет ε , т. е. возникает биение $B = 2\varepsilon$ новой окружности радиуса ρ с центром O_1 относительно прежнего центра O , представляющего ось резьбы ниппеля долота.

Радиус ρ можно также получить из решения треугольника IO_1O , образованного сторонами R , ε , ρ и углом 60° . Для нахождения неизвестных ε , ρ воспользуемся уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= R + \varepsilon - \Delta R \\ \rho^2 &= \left(R \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(\frac{R}{2} - \varepsilon \right)^2 \end{aligned} \right\}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{2R\Delta R - \Delta R^2}{3R = 2\Delta R} \approx \frac{2}{3}\Delta R, \\ B &= 2\varepsilon = \frac{4}{3}\Delta R = \frac{2}{3}\Delta D. \end{aligned} \quad (6)$$

На примере для долота III 215.9М при $d = 120$ мм, $\alpha = 57^\circ$, $z = 19$, допуск на диаметр долота $[\Delta D] = 0.7$ мм по (5) имеем $\Delta R = 0.4457$ мм, $\Delta D = 0.891$ мм, или $(0.891 \cdot 100) / 0.7 = 127\% [\Delta D]$ от поля допуска по причине погрешности диаметра, при разных поворотах шарошек на опорах.

Изложенное экспериментально подтверждено следующим наблюдением. Непроходное контрольное кольцо для замера диаметра шарошечного долота часто проваливалось сквозь шарошки при повороте их в положение соответственно схеме на рис. 5б и не проходило в положении шарошек соответственно схеме на рис. 5а. В общем случае при неравенстве трех калибрующих радиус-векторов $R_1 \neq R_2 \neq R_3$ формула (6) имеет вид

$$B = \frac{4}{3} \sqrt{\Delta R_1^2 + \Delta R_2^2 + \Delta R_3^2 - (\Delta R_1 \Delta R_2 + \Delta R_2 \Delta R_3 + \Delta R_1 \Delta R_3)}.$$

Ее вывод обоснован в [19]. При $\Delta R_1 = 0$ (база отсчета, принятая за ноль, по первой шарошке)

$$B = \frac{4}{3} \sqrt{\Delta R_2^2 + \Delta R_3^2 - \Delta R_2 \Delta R_3}. \quad (7)$$

Закон распределения случайной величины B , вычисленной по формуле (7), хорошо согласуется по статистическим критериям согласия с теоретическим законом Рэлея и отличается от распределения биения по формуле модуля разности двух случайных величин, взятой за основу в методике контроля секционных долот в сборе диаметром 165.1 – 320.0 мм РТМ 39-2-88-78 ВНИИБТ [19]. Вычисление биения по (4) более точно, чем по методике [19], так как в первом случае учитывается взаимосвязь трех калибрующих точек шарошек одной охватывающей их окружностью по диаметру, а также направление биения. Например, при допуске $[\Delta D] = 0.8$ мм на диаметр по методике ВНИИБТ имеем $B = 0.4$ мм, по предлагаемому методу — $B = 0.533$ мм, т. е. по методу ВНИИБТ допуск биения в 1.33 раза более жесткий, чем фактический.

Экспериментальное подтверждение следует из результатов замеров биения и оценки их по предлагаемому методу и методу ВНИИБТ. Для трехшарошечного расширителя III РШ 393.7/780 СГВУ получены замеры биения (таблица). По результатам статистической обработки данных получена зависимость: $B' = 1.27B$, где B' — биение, рассчитанное по (7), B — по методике ВНИИБТ.

Замеры биения, мм

Номер замера	Отклонение радиусов-векторов по шарошкам			Биение	
	1-я	2-я	3-я	по методике ВНИИБТ	по формуле (7)
1	0	+0.5	+0.5	0.5	0.666
2	0	-0.5	-0.3	0.5	0.586
3	0	-0.2	-0.7	0.7	0.860
4	0	+0.6	+0.7	0.7	0.873
5	0	-0.3	0	0.9	1.200
6	0	+0.7	0	0.7	0.933
7	0	-0.7	-0.7	0.7	0.860
8	0	-1.3	-1.5	1.5	1.880
9	0	-0.3	-0.4	0.4	0.480
10	0	-0.7	0	0.7	0.333

Для случая поля рассеивания диаметра расширителя $\Delta D = 1.872$ мм (при расчете его по размерной цепи на $\max - \min$) согласно (6) радиальное биение расширителя $B = 1.246$ мм (экспериментально получено $B = 1.5$ мм — по методике ВНИИБТ и $B' = 1.88$ мм — по формуле (7)). Полагая, что в это поле укладывается 99.99 % всех долот, вычислим среднеквадратическое круговое отклонение σ_k в распределении биения по закону Рэлея:

$$P = 1 - e^{-\frac{B^2}{2\sigma_k^2}},$$

($P = 0.9999$ — вероятность попадания в поле биения). Из зависимости $0.9999 = 1 - e^{-0.778/2\sigma_k^2}$ получаем $\sigma_k = 0.29$ мм. Среднее биение $\bar{B} = 1.253\sigma_k = 0.363$ мм. Среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0.655\sigma_k = 0.19$ мм. Вероятность попадания в допуск $[B] = 0.8$ мм: $P = 1 - e^{-0.64/2 \cdot 0.0837} = 0.978$. Экспериментально имеем $P = 0.777$.

ТОЧНОСТЬ РАДИАЛЬНОГО БИЕНИЯ КАЛИБРУЮЩИХ КОНУСОВ ЧЕТЫРЕХШАРОШЕЧНЫХ ДОЛОТ

Для четырехшарошечных долот максимальное поле допуска биения вычислялось по схеме, приведенной на рис. 6:

$$\left. \begin{array}{l} \rho = \varepsilon + R - \Delta R \\ \rho^2 = R^2 + \varepsilon^2 \end{array} \right\}, \quad \varepsilon = \frac{2R\Delta R = \Delta R^2}{2R - 2\Delta R} \approx \Delta R, \quad B = 2\varepsilon = 2\Delta R = \Delta D,$$

тогда как по (6) для четырехшарошечных долот $B = 2 / 3\Delta D$.



Рис. 6. Образование радиального биения четырехшарошечного долота

Поле допуска бienia для четырехшарошечного долота должно быть в 1.5 раза больше, чем поле бienia для трехшарошечного ($B_4 = 3 / 2B_3$). В этой связи возникает предпосылка к пересмотру допусков на выходные параметры шарошечного инструмента и введению изменений в нормативно-техническую документацию: ГОСТ 20692-2003 “Долота шарошечные. Технические условия” и ГОСТ Р 50864-96 и ОСТ 26-02-1315-84 “Долота шарошечные. Технические условия”. В частности, следует:

- указать одновременно с допусками на параметры обязательный показатель вероятности попадания в эти допуски (для 100 % попадания в существующие допуски необходимо увеличить уровень точности механической обработки в 2.5 раза);
- откорректировать размерные цепи шарошечного инструмента до совмещения центра и группирования диаметра с серединой поля допуска и ввести в документации соответствующие изменения;
- отразить в технических требованиях и в методике контроля шарошечного инструмента необходимость стабилизации условий измерения диаметра, в частности по повороту шарошек на опорах для исключения влияния его на погрешность диаметра;
- ввести изменения в существующую методику оценки радиального бienia калибрующих конусов шарошек относительно оси шарошечного инструмента так, чтобы по данным замеров бienie точнее вычислялось с учетом взаимосвязи трех калибрующих точек одной окружностью и направления бienia взамен закона модуля разности двух крайних замеров;
- в требованиях на радиальное бienie выделить четырехшарошечный инструмент от трехшарошечного, так как в первых поле бienia в 1.5 раза больше, чем во вторых при одинаковом уровне точности деталей.

ВЫВОДЫ

Предложена разработанная на основе вероятностных законов методика, позволяющая обосновать основные геометрические параметры бурowego шарошечного инструмента, включая поле допуска диаметра ΔD с оценкой вероятности до 100 %.

Показано, что вследствие поворота шарошек на опорах долота и возникновения разных комбинаций сопряжения зубьев с калибрующими точками возникает отклонение диаметра ΔD от заданного размера. В четырехшарошечных долотах при одинаковой точности калибрующих радиусов-векторов радиальное бienie по диаметру может быть в 1.5 раза больше, чем в трехшарошечных.

Установлено, что существует неувязка между назначением поля допуска диаметра шарошечных долот и полем допуска радиального бienia калибрующих конусов шарошек относительно оси бурового инструмента. Согласно расчету, учитывая взаимосвязь трех калибрующих точек одной окружностью и направление бienia, поле бienia должно быть $B = 2 / 3\Delta D$, тогда как по методике ВНИИБТ, исходя из закона модуля разности случайных калибрующих радиус-векторов отдельных шарошек, $B = \Delta D / 2$, что на 33 % жестче.

Выявленные факты следует учитывать в технической документации и методиках проектирования конструкций долот при обосновании допусков на диаметр инструмента, радиального бienia шарошек относительно оси резьбы. Тем самым учесть при производстве и контроле факторы, снижающие точность диаметра шарошечных долот, не зависимые от точности механической обработки деталей и определяемые конструкцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реготунов А. С., Жариков С. Н., Сухов Р. И., Кутуев В. А. Оценка современного состояния буро-взрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири // Проблемы недропользования. — 2021. — № 2 (29). — С. 52–62.
2. Анистратов К. Ю., Донченко Т. В., Опанасенко П. И., Строгий И. Б. Анализ рынка буровых станков для открытых горных работ горнодобывающих предприятий России // Горн. пром-сть. — 2018. — № 2 (138). — С. 84–89.
3. Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попельюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
4. Карпов В. Н., Петреев А. М. Метод определения режимов ударно-вращательного бурения скважин в прочных горных породах // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 96–109.
5. Хабибуллин М. Я., Сулейманов Р. И., Филимонов О. В. Повышение долговечности буровых трехшарошечных долот // Нефть и газ. — 2018. — № 1. — С. 74–79.
6. Борейко Д. А., Сериков Д. Ю. К вопросу о диагностике технического состояния шарошечного бурового инструмента // Сфера. Нефть и газ. — 2021. — № 4. — С. 50–54.
7. Majd H. M. and Hassani B. Improvement of roller cone drill bit design by using finite element method and experimental study, Int. J. Oil, Gas Coal Technol., 2022, Vol. 31, No. 4. — P. 382–405.
8. Boreiko D. A., Lutoev A. A., and Serikov D. Y. Theoretical studies on the nature and conditions of interaction of heel and peripheral nose cones of offset roller cone bits with a bottom hole, Min. Sci. Technol., 2022, Vol. 7, No. 3. — P. 231–239.
9. Горшенин М. А. Повышение эксплуатационных свойств шарошечных долот, оснащенных твердо-сплавными вставками, методом селективной сборки // ГИАБ. — 2000. — № 4. — С. 12.
10. Пракаш С., Мухопадхьяй А. К. Комбинированный метод Вейбулла для анализа надежности трехшарошечных долот при бурении скважин // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 68–77.
11. Slipchuk A. M., Jakym R. S., Korendiy V., and Lytvyniak Y. M. Design and technological aspects of functionally oriented technology of manufacturing the three-cone drill bits, Conf. Series: Materials Sci. Eng., IOP Publish., 2023, Vol. 1277, No. 1. — 012015.
12. Šporin J., Mrvar P., Petrič M., Vižintin G., and Vukelić Z. The characterization of wear in roller cone drill bit by rock material – sandstone, J. Petroleum Sci. Eng., 2019, Vol. 173. — P. 1355–1367.
13. Ravina K., Yang N., Brocoum S., Pasco-Anderson J., Walker R. L., Khan M., and Holsapple J. Conical drill bit for optimized external ventricular drain placement: a proof-of-concept study, J. Neurosurgery, 2023, Vol. 139, No. 3. — P. 881–891.
14. Богомолов Р. М. Методика расчета калибрующих диаметров линии калибровки шарошки и диаметра долота // Сфера. Нефть и газ. — 2020. — № 5. — С. 42–44.
15. Пяльченков В. А., Пяльченков Д. В., Долгушин В. В., Кулябин Г. А. Исследование загруженности вооружения шарошечного долота в зависимости от погрешностей его изготовления // Нефть и газ. — 2019. — № 1. — С. 113–120.

16. **Пяльченков В. А.** Моделирование загруженности подшипников опоры шарошечного долота // Механика и процессы управления: материалы Всерос. науч.-практ. конф. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. — С. 105–109.
17. **Крылов С. М., Богомолов Р. М., Носов Н. В., Дедов Н. И.** Повышение ресурса бурового шарошечного долота // Изв. СамНЦ РАН. — 2011. — № 4-3. — С. 1085–1087.
18. **Богомолов Р. М.** Анализ способов изготовления деталей и сборки шарошечных буровых долот и их влияние на работоспособность инструмента // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2020. — № 4. — С. 8–12.
19. **РД 39-2-88-78.** Методика контроля трехшарошечных секционных долот в сборе диаметром от 165.1 до 320 мм: — М.: ВНИИБТ, 1979. — 28 с.

Поступила в редакцию 07/V 2024

После доработки 28/V 2024

Принята к публикации 27/VI 2024