

УДК 622.24

Ж.Б. Тошов, И.И. Шамансуров

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННОГО
ДОЛОТА**

Несмотря на ряд проведенных исследований, закономерности движения оси шарошки изучены недостаточно. Данный вопрос приобретает особую остроту в связи с созданием комбинированного инструмента с шарошкой и резцом.

Нами рассматривается простейший случай качения венца в плоскости XOZ , перпендикулярной плоскости забоя скважины (см. рисунок). Очевидно, что его центр будет описывать окружность радиусом r [1]. Уравнения этой окружности в параметрической форме имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \\ z &= r \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r – радиус венца шарошки, мм; φ – угол поворота венца вокруг точки O , град.

Уравнение движения центра венца сложнее уравнения (1), поскольку центр (точка O), жестко связанный с бурильной трубой, определяет закон изменения параметра φ .

Закон изменения φ можно вывести из условия равномерного вращения центра вокруг оси долота. В нашем случае (см. рис.)

$$x = V = const$$

Отсюда при интегрировании получим:

$$x = Vt$$

где V – линейная скорость в направлении оси OX , м/сек; t – время, сек.

Из рисунка легко определяются закон изменения φ :

$$\varphi = \arcsin \frac{Vt}{r}, \quad (2)$$

так как

$$\frac{Vt}{r} = \sin \varphi$$

Уравнения движения примут вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \left(\arcsin \frac{Vt}{r} \right) \\ z &= r \cos \left(\arccos \frac{Vt}{r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Чтобы перейти от уравнений (3) к уравнению движения центра венца, катящегося без наклона к плоскости поперечного сечения скважины вокруг ее оси, достаточно связать линейную скорость V со скоростью вращения долота.

Из механики известно [2], что

$$V = \omega R$$

$$\text{где } \omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$$

$$\text{Тогда } V = \frac{\pi n R}{30}$$

где n – число оборотов снаряда, об/сек; R – расстояние от центра венца до оси долота, мм.

Уравнения движения центра вертикально катящегося венца шарошки определяются:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \left(\arcsin \frac{\pi n R}{30 r} t \right) \\ z &= r \cos \left(\arccos \frac{\pi n R}{30 r} t \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С помощью (4) движения центра венца описывается достаточно точно при значительных размерах долота.

Усложним задачу. Пусть точка (центр венца) движется вокруг оси OZ (см. рис.). Это движение представляет собой вращение долота вокруг оси. Уравнения для этого случая выглядят следующим образом:

Схематическое расположение произвольной точки в теле шарошки в декартовой системе координат

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \cos \psi \\ y &= r \sin \varphi \sin \psi \\ z &= r \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где ψ – переменный диаметр долота, град.

Известно, что параметры венца φ и долота ψ связаны соотношением

$$\frac{\varphi}{\psi} = i,$$

где i – передаточное отношение венца шарошки.

Тогда уравнения (5) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \cos \frac{\varphi}{i} \\ y &= r \sin \varphi \sin \frac{\varphi}{i} \\ z &= r \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При параметрической форме уравнений движения определяются составляющие скоростей в трех направлениях. Определим суммарную скорость из уравнений (6):

$$V = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

Здесь

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \left(r \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \left(\cos \varphi \cos \frac{\varphi}{i} - \frac{1}{i} \sin \varphi \sin \frac{\varphi}{i}\right)^2;$$

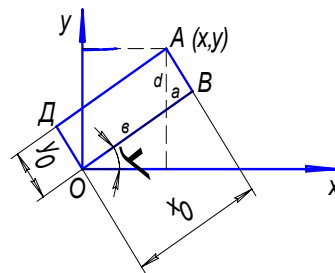
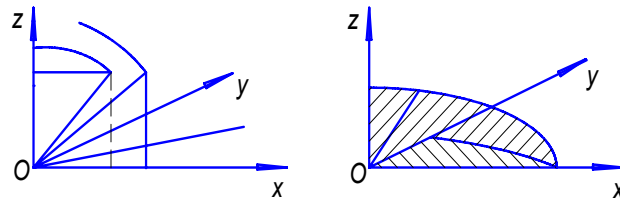
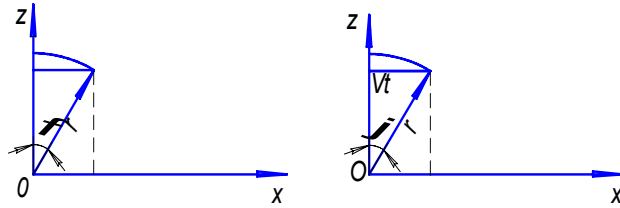
$$\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = \left(r \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \left(\cos \varphi \sin \frac{\varphi}{i} + \frac{1}{i} \sin \varphi \cos \frac{\varphi}{i}\right)^2;$$

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)^2 = \left(r \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 \sin^2 \varphi$$

Теперь

$$V = \frac{r}{i} \frac{d\varphi}{dt} \sqrt{i^2 + \sin^2 \varphi}$$

Здесь



$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\arcsin \frac{R\pi n}{30r} t \right) = \frac{\text{Sgn} B}{\sqrt{B^2 - t^2}}$$

$$B = \frac{30r}{R\pi n}, \quad i = \frac{R}{r},$$

$$\text{где } \text{Sgn} \begin{cases} -I & nru & B < 0 \\ 0 & nru & B = 0 \\ I & nru & B > 0 \end{cases}$$

Формула для вычисления скорости соударения резцовой лапы с породой можно записать в виде:

$$V = \frac{\pi r n}{\sqrt{(30r)^2 - (t\pi R n)^2}} \sqrt{R^2 + r^2 \sin^2 \left(\arg \sin \frac{\pi R n}{30r} t \right)} \quad (7)$$

Полагаем, что $t = 0$

$$\text{Тогда } V = \frac{\pi R n}{30}$$

Имеет смысл рассмотрение вертикальной составляющей скорости V , т.е.

$$\frac{dz}{dt} = -r \frac{d\varphi}{dt} \sin\left(\arg \sin \frac{\pi Rn}{30r} t\right)$$

После преобразования окончательно получим:

$$V_z = -\pi Rrn \frac{\sin\left(\arg \sin \frac{\pi Rn}{30} t\right)}{\sqrt{(30r)^2 - (\pi Rnt)^2}} \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) позволяют вычислить скорости соударения лезвия резовых лап с породой. Для этого найдем уравнение движения центра венца шарошки, учитывая наклон плоскости венца к плоскости поперечного сечения скважины.

В начальный момент плоскость венца находится в одной из плоскостей, проходящих через ось OX (см. рис.).

Плоскость венца в координатных плоскостях XOY и XOZ представляет собой эллипс, что усложняет вывод закона движения центра венца. С этой целью найдем координаты точки $A(X, Y)$ (см. рис.).

Очевидно, что для вычисления координаты Z следует учесть наклон венца к плоскости поперечного сечения скважины.

Поворот четырехугольника $ABOD$ в плоскости XOY обусловлен поворотом долота вокруг оси. Для нахождения координат X и Y точки $A(X, Y)$ определим промежуточные величины:

$$\begin{aligned} a &= y_0 \operatorname{tg} \psi, & b &= x_0 - y_0 \operatorname{tg} \psi; \\ c &= b \sin \psi = (r \sin \varphi - r \cos \beta \cos \varphi \operatorname{tg} \psi) \sin \psi; \\ d &= \frac{\alpha}{\sin \psi} = \frac{r \cos \beta \cos \varphi}{\cos \psi} \end{aligned}$$

Теперь легко найти

$$\left. \begin{aligned} x &= b \cos \psi = (x_0 - y_0 \operatorname{tg} \psi) \cos \psi = \\ &= (r \sin \varphi - r \cos \beta \cos \varphi \operatorname{tg} \psi) \cos \psi \\ y &= (r \sin \varphi - r \cos \beta \cos \varphi \operatorname{tg} \psi) \sin \psi + \frac{r \cos \beta \cos \varphi}{\cos \psi} \\ z &= r \sin \beta \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Окончательно получим

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \cos \psi - r \cos \beta \cos \varphi \sin \psi \\ y &= \frac{r}{\cos \psi} (\sin \varphi \cos \psi \sin \psi - \cos \beta \cos \varphi \sin^2 \psi + \cos \beta \cos \varphi) \\ z &= r \sin \beta \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где r – радиус венца, мм; φ – переменный параметр венца, град; ψ – переменный параметр

долота, град; β – угол наклона плоскости венца к плоскости поперечного сечения скважины, град.

Полагая из (10), что $\beta = 90^\circ$, найдем уравнение движения центра вертикально катящегося венца.

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \cos \psi \\ y &= r \sin \varphi \sin \psi \\ z &= r \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для уравнения движения (II), т.е. для случая качания наклонного венца по окружности забоя по аналогии с ранее рассмотренным случаем можно вычислить вращение, определяющее скорость соударения резовых лап о породу. Однако полученная формула довольно громоздка и неудобна для вычисления и анализа. Поэтому остановимся только на вертикальной составляющей этой скорости, т.е. найдем V_z :

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{dz}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \left(r \sin \beta \frac{d\varphi}{dt} \right) \frac{d}{d\varphi} (\cos \varphi) = \\ &= -r \sin \beta \frac{\operatorname{Sgn} B}{\sqrt{B^2 - t^2}} \sin\left(\arg \sin \frac{\pi Rn}{30r} t\right) \end{aligned}$$

Окончательно получим:

$$V_z = -\pi Rn \sin \beta \frac{\sin\left(\arg \sin \frac{\pi Rn}{30} t\right)}{\sqrt{(30r)^2 - (\pi Rnt)^2}}$$

Очевидно, что при $\beta = 90^\circ$ формула (10) перейдет в (11).

Из уравнений (10) можно также найти и уравнение движения центра венца, катящегося прямолинейно (наклонно к горизонтальной плоскости), полагая $\psi = 0$.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \varphi \\ y &= r \cos \beta \cos \varphi \\ z &= r \sin \beta \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Используя ранее рассмотренные приемы, найдем:

$$V = -\pi Rn \sin \beta \frac{\sin\left(\arg \sin \frac{\pi Rn}{30} t\right)}{\sqrt{(30r)^2 - (\pi Rnt)^2}} \quad (13)$$

В результате исследований установлено, что формула (13) наиболее удобна для анализа и расчетов скоростей соударения резовых лап с забоем скважины. Полученные исследо-

вания дают основы расчетов скоростей взаимодействия рабочих органов комбинированного долота (резцово-шарошечное долото).

Схема перемещения зубьев венца шарошки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маньковский Т.И., Швец В.В., Мартынюк Г.К. Аналитические исследования взаимодействия шарошечного инструмента с породой. М. Изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1964.

2. Шимкович А.А. Механика. Минск, изд. «Высшая школа», 1969.

Коротко об авторах

Тошов Ж.Б. — Навоийский государственный горный институт,
Шамансуров И.И. — Зарафшан ГПЭ, Узбекистан.



© Ж.Б. Тошов, 2005

УДК 622.24

Ж.Б. Тошов

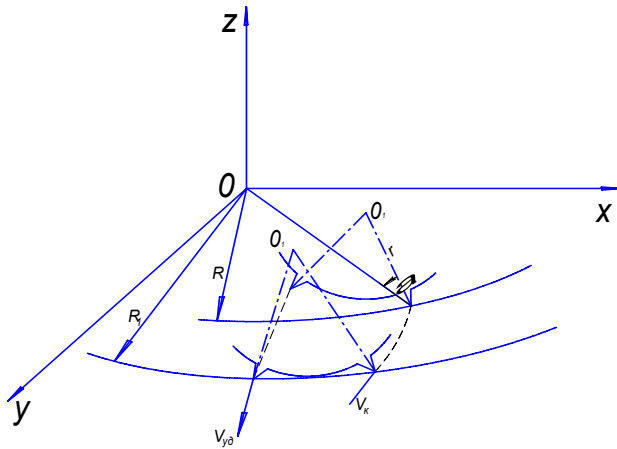
ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА ШАРОШКИ

Механизм взаимодействия зубьев шарошек, равно как и рабочих элементов комбинированных долот [1] с поверхностью забоя скважины принято рассматривать или как работу элементарных режущих элементов, или как вдавливание пуансонов. Естественно, в разной степени оба эти явления присущи зубьям шарошечных долот той или иной модификации. Так, работу зубьев одношарошечных лопастных долот можно рассматривать лишь как работу режущих элементов.

Более спорным представляется механизм зубьев трехшарошечных долот. Здесь существует две точки зрения. Одна заключается в том, что основную работу по разрушению горной породы совершает зуб в момент соударения с поверхностью забоя скважины, т.е. гор-

ная порода разрушается сколом. Сторонники другой точки зрения полагают, что основной объем горной породы при бурении приходится на статическое и усталостное разрушения при периодическом приложении соответствующих нагрузок. В пользу этой гипотезы авторы выдвигают закономерность слабого влияния скорости вращения бурового долота на удельный объем разрушения горной породы при бурении.

Для того чтобы внести большую ясность в этот вопрос, приведем аналитические исследования скоростей движения зубьев шарошек во время их контакта с поверхностью забоя скважины, что внесёт определенную ясность в механизм рабочих элементов комбинированных буровых долот.



Пусть венец радиусом r перекатывается по окружности на забое скважины радиусом R , тогда угол наклона плоскости венца к плоскости поперечного сечения скважины равен α (рисунок).

Параметрические уравнения траекторий движения контактирующего и стремящегося в контакт с забоем зубьев катящегося венца, выведенные с помощью геометрических построений, соответственно имеют вид

$$\left. \begin{aligned} x &= R' \cos(\varphi - \Delta\varphi) \\ y &= R' \sin(\varphi - \Delta\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= R' \cos(\varphi + \Delta\varphi) - x_0 \\ y &= R' \sin(\varphi + \Delta\varphi) - y_0 \\ z &= r(1 - \cos\psi) \sin\alpha - z_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ и ψ – переменные параметры долота и венца, град; $\Delta\varphi = \arctg \frac{r \sin\psi}{R}$;

$$R' = \sqrt{[R - r(1 - \cos\psi) \cos\alpha]^2 + r^2 \sin^2\psi}$$

Закономерность изменения переменных параметров φ и ψ с использованием геометрического построения найдена нами в форме [2]

$$\psi = \arg \sin \left[\frac{2(R - r \cos\alpha) \sin \varphi / 2}{r} \right], \quad 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{z_1} \quad (3)$$

где Z_1 – количество зубьев на венце, шт.

По формуле теоретической механики [3].

$$V = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (4)$$

аналитические выражения для вычисления скоростей соответствующих зубьев данного венца

найдем в виде

$$V_k = \frac{\pi n}{30} \sqrt{A + B(C - D)^2} \quad (5)$$

$$V_y = \frac{\pi n}{30} \sqrt{A + B(C + D)^2 + E} \quad (6)$$

где V_k – скорость контактирующего зуба, мм/с; V_y – скорость зуба, стремящегося в контакт с породой, мм/с.

$$A = \frac{\{r[R - r(1 - \cos\psi) \cos\alpha] \cos 2\cos\psi + r^2 \sin\psi \cos\psi\}^2}{[R - r(1 - \cos\psi) \cos\alpha]^2 + r^2 \sin^2\psi};$$

$$B = [R - r(1 - \cos\psi) \cos\alpha]^2 + r^2 \sin^2\psi;$$

$$C = \frac{2r \cos\psi}{\sqrt{(R - r \cos\alpha)^2 - r^2 \sin^2\psi}};$$

$$\Delta = \frac{Rr \cos\psi}{R^2 + r^2 \sin^2\psi};$$

$$E = r^2 \sin^2\psi \sin\alpha;$$

$$\psi = \frac{\pi}{z}$$

Вычислим скорости движения контактирующих зубьев венцов шарошки несмещенными осями вращения в плане при условии их

Исходные данные и результаты вычислений по формулам (5) и (6)

R (мм)	r (мм)	α (град.)	z (шт.)	n (об/сек.)	V _к (м/сек.)	V _у (м/сек.)
160	98	52	20	10	0,149	0,339
120	73	52	20	10	0,097	0,246
80	49	52	20	10	0,074	0,169
40	24	52	20	10	0,035	0,082

чистого качения в момент достижения ими крайней точки траектории контакта (V_k), а зубьев стремящихся в контакт в момент их соударения с поверхностью забоя скважины. В данном случае чистое качение определяется условиями (3), что означает отсутствия влияния на вращения венца сил со стороны смежных с ним венцов.

Геометрические параметры венцов и результаты вычислений при скорости вращения долота $n = 600 \text{ об/мин}$. по формулам (5) и (6) сведены в таблицу.

Анализ результатов вычислений показывает, что порядок величин скоростей как V_k , так и V_y , по венцам шарошки постоянный, но абсолютные величины тех и других остаются малыми.

Наиболее интересен, на наш взгляд, факт незначительных по абсолютным величинам скоростей соударения зубьев шарошек с породой. Так чтобы достичь скоростей соударения зубьев шарошек такого долота с забоем, исчисляемых единицами м/сек , число оборотов долота должна превышать десятки тысяч. На первый взгляд этот факт представляется парадоксальным. Но возьмем формулу вычисления линейной скорости при сложном движении

$$V = \omega \rho \quad (7)$$

где V – линейная скорость, м/сек ; ω – угловая скорость, рад/сек ; ρ – расстояния от движущейся точки до мгновенного центра вращения, м .

Очевидно, в этом случае за мгновенный центр вращения приближенно можно принять вершину контактирующего зуба, а за разницу мгновенно вращения – расстояние между вершинами смежных зубьев венца.

Расстояния между вершинами смежных зубьев невелики и исчисляются всегда миллиметрами, предел изменения угла не превышает единиц градусов. Следовательно, не должно быть и большой величины угловой скорости – ω , а потому величины линейных скоростей движения контактирующего и смежного с ним зубьев, будут, очевидно малы.

Возвращаясь к результатам исследований, следует заметить следующее:

1. Эффективность разрушения горной породы зубчатыми шарошками далека от идеала и нуждается в корректировке на пути совершенствования буровых породоразрушающих инструментов исходя из рациональной динамики вооружения.

2. Наиболее перспективным направлением в этом плане представляется создание и совершенствование буровых долот с комбинированной динамикой от лап, несущих шарошки и резовые элементы.

3. Полученные результаты исследований позволяют определить динамику и кинематику работы рабочих органов шарошечных долот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. № 891882 (СССР) Комбинированное буровое долото М.Кл³ Е 21 В 10/14, Б.И. № 17, 23.12.81.
2. Отчёт по этапу III темп 1-НБ-77, Фонд СредАзНИИгаза, Ташкент 1977 – 115 с.
3. Бухгольц А.И. Основной курс теоретической механики. – М.: Наука 1969. – 468 с.

Коротко об авторах

Тошов Ж.Б. – Навоийский государственный горный институт,

