

УДК 622. 24.05

И. Д. Богомолов, М. К. Хуснутдинов

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БУРЕНИЯ СКВАЖИН НЕКРУГЛОЙ ФОРМЫ ШАРОШЕЧНЫМ ДОЛОТОМ

Известно, что использование концентраторов напряжения на стенках скважины с некруглым поперечным сечением позволяет создавать направленное действие взрыва и управлять процессом дробления массива горной породы. Рациональным путем является совмещение во времени функции бурения и создания концентратора. Для этого можно бурить скважины, например, прямоугольной, треугольной формы, сопряжение стенок у которых образует концентратор напряжений. Для указанной цели предлагается использовать шарошечное долото [1,2]. Далее излагаются некоторые теоретические исследования возможности бурения шарошечным долотом скважины с некруглым поперечным сечением.

Работу шарошки долота можно представить как движение тела вокруг неподвижной точки. Поэтому движение каждой точки на ее поверхности можно описать, рассматривая движение подвижного конуса, который обкатывает неподвижный конус – забой. Указанным способом движение описывается при совпадении центра вращения с вершиной подвижного конуса – при совершенном конусе, поэтому далее под конусом шарошки будет подразумеваться ее совершенный конус, который характеризует передаточное отношение долота. Движение точки определим с помощью углов Эйлера [3]:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \psi(t) \\ \dot{\phi} = \phi(t) \\ \dot{\theta} = \theta(t) \end{cases}$$

где  $\psi$  - угол поворота шарошки вокруг оси скважины;  $\phi$  - угол поворота шарошки вокруг своей оси;  $\theta$  - угол между осью вращения шарошки и долота;  $\dot{\psi}$ ,  $\dot{\phi}$  и  $\dot{\theta}$  с точкой - производные по времени  $\psi$ ,  $\phi$  и  $\theta$ , соответственно.

На основе уравнений кинематики получим уравнения углов конусности:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin \theta}{i - \cos \theta}, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{i \sin \theta}{1 - i \cos \theta}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - угол конусности шарошки и забоя соответственно;  $I$  - передаточное отношение долота.

Для получения заданного контура необходимо, чтобы передаточное отношение долота принимало постоянное требуемое значение: для всех форм сечения с центральной симметрией – 2; для равностороннего треугольника – 1,5, 3; для квадратного сечения – 1,33, 2, 4.

Дифференцируя уравнение (1) найдем максимальные значения угла конусности шарошки в зависимости от передаточного отношения долота (рис. 1):

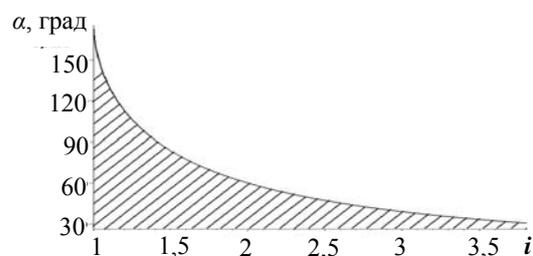


Рис. 1. Область допустимых значений угла конусности шарошки в зависимости от передаточного отношения долота

$$\alpha = 2 \arctg \left( \frac{I}{\sqrt{i^2 - 1}} \right)$$

Практически приемлемые значения передаточного отношения (рис. 1) не превышают 2 – 2,5.

Угол конусности  $\alpha$  может варьироваться в зависимости от значения угла  $\theta$ , то же происходит с величиной угла  $\beta$ , которую далее выразим через  $\gamma = 90 - \beta$  (рис. 2).

Кроме этого возможные значения угла конусности шарошки и наклона ее к оси вращения

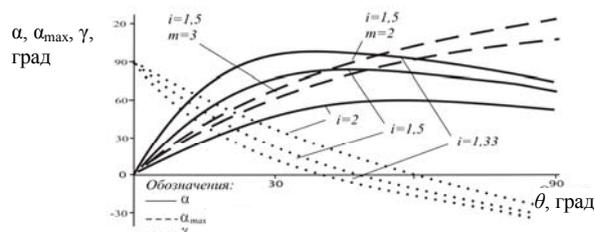


Рис. 2. Параметры долота в зависимости от угла наклона оси шарошки к оси вращения долота

долота ограничиваются из условия отсутствия касания шарошек между собой [4]:

$$\sin \frac{\alpha_{max}}{2} = k \sqrt{\frac{2k^2 + 1 \pm 2k \sqrt{\frac{k^2 + 1}{1 + \tan^2 \gamma}} \operatorname{tg} \gamma}{(2k^2 + 1)^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma}}, \quad (3)$$

где  $k = \operatorname{tg} \chi$ ;  $\chi = \pi/m$  – проекция половины угла  $\alpha$  на плоскость, перпендикулярную оси скважины;  $m$  – число шарошек в долоте; знак плюс соответствует выпуклому, а знак минус – вогнутому забою.

Линия соприкосновения конусов со значениями углов, найденных по формуле (1) и (2) – прямая и совпадает с мгновенной осью вращения. Отрезок  $\rho$  на этой прямой, соединяющий центр вращения и точку на калибрующей кромке шарошки является

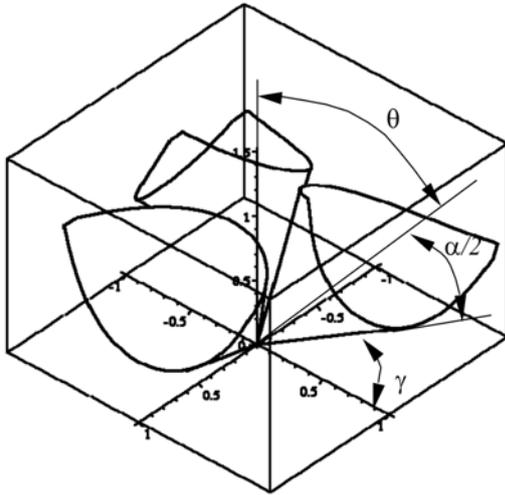


Рис. 3. Калибрующие кромки шарошек при квадратном сечении ( $i=2$ ,  $\psi=\pi/4$ )

образующей конуса и должен иметь длину, изменяющуюся по закону, соответственно заданной форме поперечного сечения скважины [1]. Другим критерием, необходимым для получения заданного сечения скважины, является условие, при котором точка на калибрующей кромке не должна выходить за пределы поперечного сечения скважины при вращении шарошки.

Уравнения движения точки в неподвижной системе координат можно представить в параметрическом виде:

$$\begin{cases} x = \rho \left( a_1 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \delta + b_1 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \delta + c_1 \cos \frac{\alpha}{2} \right) \\ y = \rho \left( a_2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \delta + b_2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \delta + c_2 \cos \frac{\alpha}{2} \right) \\ z = \rho \left( a_3 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \delta + b_3 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \delta + c_3 \cos \frac{\alpha}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

где  $\delta$  – центральный угол в подвижной системе координат, связанной с шарошкой и центр которой совпадает с центром вращения долота;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – направляющие косинусы углов между подвижной и неподвижной системой координат:

$$\begin{aligned} a_1 &= \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi \cos \theta \\ a_2 &= -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi \cos \theta \\ a_3 &= -\cos \varphi \sin \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \cos \varphi \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi \cos \theta \\ b_2 &= -\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta \\ b_3 &= \sin \varphi \sin \theta \end{aligned}$$

$$c_1 = \cos \psi \sin \theta$$

$$c_2 = \sin \psi \sin \theta$$

$$c_3 = \cos \theta$$

Пользуясь уравнениями (4), проанализировано формирование поперечного сечения скважины и взаимодействие шарошек с ее стенкой, как показано на рис. 3, где угол  $\delta$  задан как параметр.

Для определения условий, при которых точка на калибрующей кромке шарошки не выходит за пределы поперечного сечения скважины при ее вращении рассмотрены элементарные случаи.

1. Прямоугольное и треугольное сечения.

Рассмотрим взаимодействие шарошки с одной из сторон и сопряженной стороной в отдельности. Для первого случая, учитывая, что  $\varphi = i \cdot \psi$ , решим следующую систему уравнений на промежутке  $0 \leq \delta \leq i \cdot \varepsilon$ ,  $-\varepsilon \leq \psi \leq \varepsilon$ :

$$\begin{cases} x = \rho \begin{pmatrix} a_1 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \delta + \\ b_1 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \delta + c_1 \cos \frac{\alpha}{2} \end{pmatrix} \\ x = \frac{a}{2} \end{cases}$$

где  $\rho = a / \cos(\delta / i) / \cos \gamma$ ,  $\varepsilon = \operatorname{arctg}(a / b)$ ;  $a$  и  $b$  – сторона прямоугольника наибольшая и наименьшая, соответственно.

В результате получим уравнение поверхности уровня, которая удовлетворяет условию  $x = a/2$  (рис. 4):

$$\begin{aligned} & [\cos \delta \sin i \psi \sin \psi + \sin \delta \cos i \psi \sin \psi + \\ & + i \cos \psi - i \cos \frac{\delta}{i}] \\ \cos \theta &= \frac{\quad}{\cos \psi (\cos \delta \cos i \psi - \sin \delta \sin i \psi - 1)} \end{aligned} \quad (5)$$

Значения угла  $\theta$ , удовлетворяющие условию (5), будут уменьшаться при увеличении значения угла  $\delta$ , которому соответствует точка на калибрующей кромке шарошки, а значит, достигнут минимума в угле сечения скважины.

Поскольку конструктивно угол  $\theta$  у долота имеет постоянные значения, а при его увеличении значение координаты  $x$  увеличивается, нужно найти ее минимум, который для шарошки будет являться максимально допустимым. Для этого относительно  $\delta$  решим уравнение:  $\partial\theta/\partial\psi = 0$ .

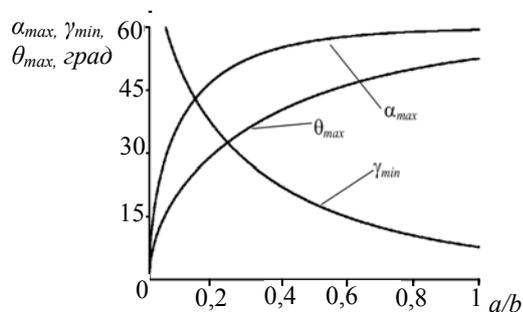


Рис. 4. Допустимые параметры конуса шарошки при прямоугольном сечении ( $i=2$ )

С достаточной степенью точности для указанных целей получим приближенно: для прямоугольника  $\delta = -6\psi$ ; для квадрата при  $i = 1.33$   $\delta = -2.19\sin(1.80\psi)$ ; для треугольника  $\delta = -2.45\sin(1.78\psi)$ .

Подставив полученные значения в (5) определим максимально допустимые значения угла  $\theta$ . Из приведенных зависимостей на рис. 4 видно, что наибольшее значение угла конусности  $\alpha$  достигается при квадратном сечении. Для квадрата имеем  $a/b=1$ , поэтому существует одно единственное значение, при  $\delta_{max} = \pi/3$  и  $i=1,33 - \theta_{max}=37,7$  град, что, согласно рис. 2, соответствует  $\alpha_{max}=96,9$  град. Для равностороннего треугольника аналогично получим при  $\delta_{max} = \pi/2$  и  $i=1,5 - \theta_{max}=39,9$  град, что, согласно рис. 2, соответствует  $\alpha_{max}=82,2$  град.

Для второго случая (взаимодействие с сопряженной стороной многоугольника) найдем максимальное значения координаты  $y$ :

$$y = \rho \left( a_2 \sin \frac{\alpha}{2} \cos \delta + b_2 \sin \frac{\alpha}{2} \sin \delta + c_2 \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

где для прямоугольника и квадрата в частности  $\rho = b/2 / \cos(\pi/2 - \delta/i)\sin\gamma$ ; для равностороннего треугольника  $\rho = a_1 / \cos(3\pi/2 - \delta/i)\sin\gamma$ ;  $a_1$  – радиус вписанной окружности в треугольник.

Решив относительно  $\psi$  уравнение:  $\partial y / \partial \delta = 0$ , найдем для максимальных значений координаты  $y$  при  $i=2$ :  $\psi = \pi - \delta / 2$ . Это значит, что максимальными значениями координаты  $y$  будут являться значения, соответствующие стороне прямоугольника. Таким же образом аналогичные результаты можно получить для квадратного сечения и равностороннего треугольника.

2. Сечение с формой эллипса.

В качестве условия, необходимого для получения заданного сечения, примем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2} \\ R = \frac{a'b'}{\sqrt{b'^2 x^2 / (x^2 + y^2) + a'^2 y^2 / (x^2 + y^2)}} \end{cases}$$

где  $a$  и  $b$  со штрихом – большая и малая ось эллипса, соответственно;  $R$  – радиус скважины;  $x$  и  $y$  – координаты, согласно уравнениям (4), в

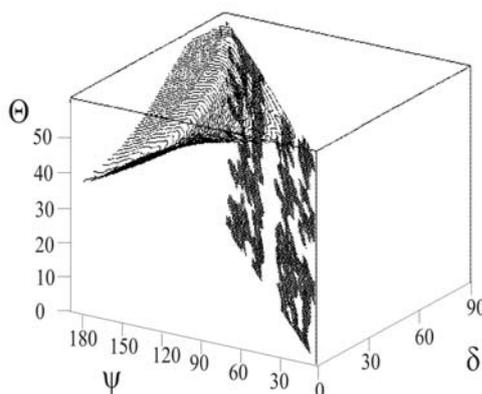


Рис. 5. Поверхность уровня ( $a'/b' = 0.2$ ) для эллиптического сечения,

которых

$$\rho = \frac{a'b'}{\sqrt{b'^2 \cos^2 \frac{\delta}{i} + a'^2 \sin^2 \frac{\delta}{i}}}$$

Решением этой системы уравнений является функция, заданная в неявном виде, которая показана на рис. 5, где видно, что кроме касания шарошкой стенки скважины на забое (на рис. 5 плоскость  $\delta = -2\psi$ ), их пресечение происходит в точке, расположенной выше забоя. Анализ решений показывает, что значения угла  $\theta_{max}$  для долота изменяются от нуля до  $\pi/3$  когда соотношения  $a'/b'$  меняется от нуля до единицы.

3. Сечение, образованное пересечением двух равных окружностей.

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2}; \\ R = (s - R_1) \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times \\ \times \sqrt{(R_1 - s)^2 \frac{x^2}{x^2 + y^2} + 2R_1s - s^2}, \end{cases}$$

где  $s$  – половина участка перекрытия окружностей на прямой, соединяющей их центры;  $R_1$  – радиус окружностей;  $R$  – радиус скважины;  $x$  и  $y$  – координаты, согласно уравнениям (4), в которых

$$\rho = (s - R_I) \cos \frac{\delta}{i} \times \\ \times \sqrt{(R_I - s)^2 \cos^2 \frac{\delta}{i} + 2R_I s - s^2}.$$

Анализ решений показывает, что, если принять  $s = 1$ , значения угла  $\theta_{max}$  для долота изменяются от нуля до  $\pi/3$  когда величина  $c = s/R_I$  меняется от нуля до единицы.

Следовательно, если стороны многоугольного сечения имеют кривизну, допустимые значения углов  $\theta_{max}$  и  $\alpha_{max}$  увеличиваются, когда сечение стремится принять круглую форму. Для их определения следует выделить элемент сечения (рис. 6), в котором отношение расстояний  $a/b$

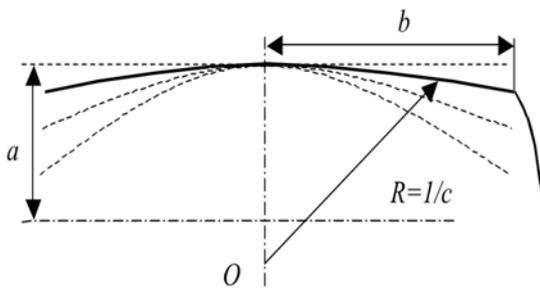


Рис. 6. Схема фрагмента поперечного сечения скважины

является минимальным. При увеличении кривизны стенки скважины с данные значения увеличиваются (рис. 7).

Таким образом, при движении шарошки

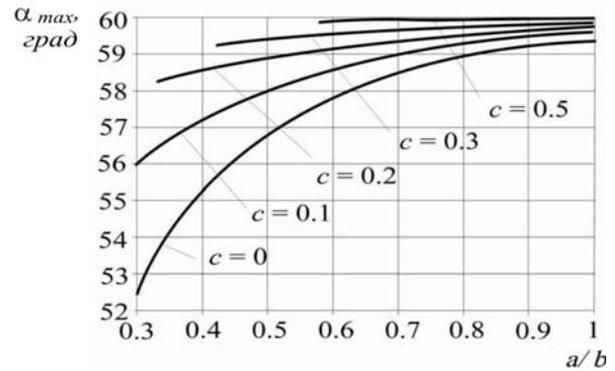


Рис. 7. Зависимость угла конусности шарошки от формы поперечного сечения скважины ( $i=2$ )

долота без скольжения, можно получить сечение заданной формы. Изменяя форму сечения скважины можно получать практически приемлемые конструктивные параметры шарошек долота. Если сечение состоит из прямых линий и образует квадрат, треугольник или другое сечение в виде многоугольника, отношение длины перпендикуляра  $a$ , опущенного от центра вращения долота к наибольшей стороне многоугольника в сечении скважины, к длине отрезка  $b$  на этой стороне, соединяющего точку его касания с перпендикуляром и угол фигуры, определяет допустимую величину угла конусности шарошки  $\alpha$  и угла между осью ее вращения и долота  $\theta$ . При сечении скважины с центральной симметрией возможна конструкция трехшарошечного долота, при треугольном сечении возможна конструкция только двухшарошечного долота при изменении кривизны стенок скважины или скруглении ее углов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомолов И. Д., Соколова Е. К. Устройства для бурения скважин с поперечным сечением некруглой формы // Механиз. Горн. Работ / Кузбасский гос. техн. ун-т. Кемерово, 1993. С. 32-34
2. Богомолов И. Д., Хуснутдинов М. К. Анализ направлений по созданию исполнительного органа для бурения скважин с концентраторами напряжений // Совершенствование технологических процессов при разработке месторождений полезных ископаемых: Сб. науч. Тр., № 19 / Ред. Кол. Егоров П. В. (отв. Ред.) и др.: Науч.-техн. центр «Кузбассуглетехнология» - Кемерово, 2002. С. 120-124
3. Смокотин Г. Я., Ходор А. Д., Тетерин Н. А. Кинематические задачи. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1967. 126 с.
4. Бирюков И. М. Шарошечное бурение в горном деле. – М.: Госгортехиздат, 1962. 164 с.

□ Авторы статьи:

Богомолов  
Игорь Дмитриевич  
– докт. техн. наук, проф. каф.  
горных машин и комплексов

Хуснутдинов  
Михаил Константинович  
– ассистент кафедры  
горных машин и комплексов