

УДК 622.24.05

А.Г.КАЛИНИН
(МГРИ),

А.Ф.ФЕДОРОВ, К.М.СОЛОДКИЙ,
А.С.ПОВАЛИХИН, Г.В.КОРОСТЕЛОВА
(ВНИИЕТ)

ВЫБОР КРИТЕРИЯ И МЕТОД РАСЧЕТА КОМПОНОВОК НИЗА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ КОЛОНКОВОГО БУРЕНИЯ

Расчет и проектирование компоновок низа бурильной колонны (КНБК) предполагает определение таких геометрических параметров (диаметр центров и их расположение относительно буровой коронки), при которых достигается максимальный функциональный эффект. Такие геометрические параметры КНБК называются оптимальными, а определение параметров – оптимизацией КНБК. Успешное решение указанной задачи в значительной мере зависит от выбора расчетной схемы и критерия оптимизации геометрических параметров КНБК. Применительно к колонковому бурению помимо реализации проектного профиля ствола скважины необходимо обеспечить качественное формирование керна и его сохранность. Указанное обстоятельство предъявляет повышенные требования к выбору критерия расчета геометрических параметров КНБК.

Наиболее благоприятные условия для формирования буровой коронкой керна достигаются при отсутствии поперечной силы на керн со стороны коронки и при их соосном расположении^х. В противном случае керн может разрушаться внутренней поверхностью коронки, а также заклиниваться внутри колонковой трубы.

Для определения поставленных условий рассмотрим известное уравнение упругой линии КНБК^{хх}, которое после дифференцирования и обезразмеривания может быть представлено в следующем виде:

$$y''' + y'(p - x) - x + h = 0, \quad (I)$$

где y''' – поперечная (перерезывающая) сила, Н,

$$y'' = \frac{Y m^2}{tg(AL)};$$

y' – угол поворота оси КНБК, град.;

^х С.С.Сулакшин. Направленное бурение. М.: Недра, 1987.

^{хх} Г.Вудс, А.Лубянский. Искривление скважины при бурении. М.: Недра, 1980.

$$y' = \frac{Y'}{\operatorname{tg}(AL)}; \quad p = \frac{P}{mq \cos(AL)};$$

$$h = \frac{H}{mq \sin(AL)}; \quad m = \sqrt[3]{\frac{EJ}{q \cos(AL)}};$$

AL - зенитный угол скважины, град.; P - осевая нагрузка на коронку, кН; p - осевая реакция забоя, кН; q - вес единицы длины трубы в промывочной жидкости, кН/м; H - поперечная сила на коронке, кН; h - поперечная реакция на опоре, кН; EJ - жесткость буровой (колонковой) трубы, кН·м²; m - масштаб длины.

Если начало координат совпадает с центром коронки, то уравнение (1) при $x = 0$ будет выглядеть следующим образом:

$$y_0'' + y_0' p = h_0. \quad (2)$$

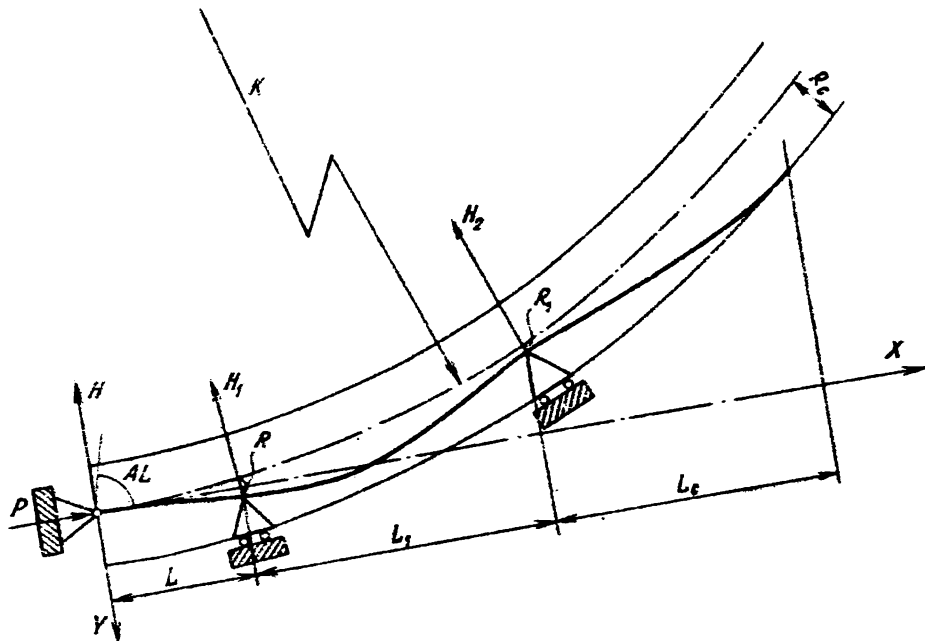
Анализ выражения (2) показывает, что для выполнения условий $h_0 = 0$ и $y_0' = 0$ необходимо иметь на коронке $y_0''' = 0$. При условии $h_0 = 0$ и $y_0' = 0$, т.е. при равенстве нуля поперечной силы на коронке и угла между осями коронки и касательной к оси скважины, мы вправе считать, что буровая коронка разрушает горную породу в направлении своей оси. При этом в процессе бурения не происходит фрезерования боковой поверхности коронки стенки ствола скважины и керна. Второй задачей КНБК является выполнение профиля ствола скважины, включающего участки малоинтенсивного увеличения, уменьшения и стабилизации зенитного угла. Для этого необходимо выбрать такие геометрические параметры (количество центраторов, их диаметр и расстояние между ними), при которых сформулированные условия ($y' = 0$ и $y''' = 0$) на коронке сохраняются на всем интервале выполнения элемента профиля ствола скважины.

В расчетной схеме (см. рисунок) КНБК рассматривается как упругая равновесностная балка, расположенная на точечных опорах в криволинейном стволе скважины. Закрепление нижнего конца балки шарнирное. Балка нагружена продольными и поперечными силами и вращается вокруг собственной оси. Условия на буровой коронке в соответствии с расчетной схемой и принятым критерием оптимизации могут быть выражены следующим образом: прогиб $y_0 = 0$; угол $y_0' = 0$; изгибающий момент $y_0'' = 0$; поперечная сила $y_0''' = 0$.

Расчет основывается на решении уравнения (1), которое записывается для каждого участка КНБК с соответствующим индексом. При этом сопряженно-граничные условия на центраторах и в точке касания буровой колонны стенки ствола скважины имеют вид

$$y_i = y_{i+1} = r_i; \quad y_i' = y_{i+1}'; \quad y_i'' = y_{i+1}'';$$

$$y_c = r_c + s \left[k - \sqrt{k^2 - (l + \dots + l_c)^2} \right]; \quad (3)$$



Расчетная схема компоновки низа бурильной колонны

$$y'_c = s \frac{l + \dots + l_c}{\sqrt{k^2 - (l + \dots + l_c)^2}}; \quad (3)$$

$$y''_c = s \frac{k^2}{[k^2 - (l + \dots + l_c)^2]^{3/2}},$$

$$y'_c = \frac{Y_c'' m}{\operatorname{tg}(AL)},$$

где r_i - радиальный зазор между центраторами и стенкой ствола скважины;
 r_c - радиальный зазор между бурильной колонной и стенкой ствола скважины;
 k - радиус кривизны ствола скважины; l_c - расстояние от верхней точки центратора до точки касания бурильными трубами стенки ствола скважины;
 l - расстояние между коронкой и нижним центратором; s - показатель знака кривизны ствола скважины;

$$r_i = \frac{R_i}{m \operatorname{tg}(AL)}; \quad k = \frac{K \operatorname{tg}(AL)}{m};$$

$$r_c = \frac{R_c}{m \operatorname{tg}(AL)}; \quad l = \frac{L}{m}; \quad l_c = \frac{L_c}{m};$$

R_i, R_c, K, L, L_c - размерные аналоги параметров r_i, r_c, k, l, l_c .

Точное решение уравнения (I) хотя и существует, но не представляет практического интереса, поскольку содержит бесконечные ряды. Предлагаемый метод решения заключается в следующем. На каждом участке КИБК искомая функция y разлагается в ряд Тейлора вокруг начальной точки участка: вокруг точки $x_0 = 0$ для первого участка от коронки; $x_0 = l$ для второго участка; $x_0 = l_{1R}$ для третьего участка; $x_0 = l_{2R}$ для четвертого участка, где l - расстояние до первого центратора от коронки; $l_{1R} = l + l_1$ - расстояние до второго центратора от коронки; $l_{2R} = l + l_1 + l_2$ - расстояние до третьего центратора от коронки.

Функция имеет вид

$$y(x) = y_0 + \frac{y_0^I}{1!} (x-x_0) + \frac{y_0^{II}}{2!} (x-x_0)^2 + \frac{y_0^{III}}{3!} (x-x_0)^3 + \frac{y_0^{IV}}{4!} (x-x_0)^4 + \frac{y_0^V}{5!} (x-x_0)^5 + \frac{y_0^{VI}}{6!} (x-x_0)^6, \quad (4)$$

где y_0 и y_0^i - значения функции и ее i -х производных в точке x_0 .

Вид или значения y_0 , y_0^I и y_0^{II} определяются из граничных условий в точке x_0 , а y_0^i , $i = 3, 6$ - исходным уравнением (I) и его производными в точке x_0 .

$$\begin{aligned} y_0^{III} &= x_0 y_0^I - \rho y_0^I + x_0 - h = (x_0 - \rho) y_0^I - x_0 - h; \\ y_0^{IV} &= y_0^I + x_0 y_0^{II} - \rho y_0^{II} + 1 = y_0^I + (x_0 - \rho) y_0^{II} + 1; \\ y_0^V &= y_0^{II} + y_0^{II} + (x_0 - \rho) y_0^{III} = 2 y_0^{II} + (x_0 - \rho) y_0^{III}; \\ y_0^{VI} &= 2 y_0^{III} + y_0^{III} + (x_0 - \rho) y_0^{IV} = 3 y_0^{III} + (x_0 - \rho) y_0^{IV} \end{aligned} \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим конкретный вид функций и вытекающих отсюда решений для задач с двумя участками. Задача с двумя участками описывается двумя уравнениями:

$$\begin{aligned} y^{III} - x y^I + \rho y^I - x + h &= 0; \\ y_1^{III} - x y_1^I + \rho y_1^I - x + h_1 &= 0 \end{aligned}$$

и граничными условиями:

в точке $x = 0$

$$y = 0; \quad y^I = 0; \quad y^{II} = 0; \quad y^{III} = 0;$$

в точке $x = l$

$$y = y_1; \quad y^I = y_1^I; \quad y^{II} = y_1^{II};$$

в точке $x = l + l_c = l_{cR}$

$$\begin{aligned} y_1 &= r_c + s [k - \sqrt{k^2 - l_{cR}^2}]; \\ y_1^I &= s \frac{l_{cR}}{\sqrt{k^2 - l_{cR}^2}}; \quad y_1^{II} = s \frac{k^2}{[k^2 - l_{cR}^2]^{3/2}} \end{aligned}$$

Граничные условия в точке $x = 0$ и уравнения (5) позволяют определить коэффициенты разложения (4) на 1-м участке:

$$B_1 = y(0) = 0; \quad B_2 = y'(0) = 0; \quad B_3 = y''(0) = 0; \quad B_4 = y'''(0) = 0; \\ B_5 = y^{IV}(0) = 1; \quad B_6 = y^V(0) = 0; \quad B_7 = y^{VI}(0) = -p,$$

а также значение $h = 0$.

В соответствии с уравнениями (5) функция на I-м участке приобретает вид

$$y = \frac{1}{24} x^4 - \frac{p}{720} x^6 \quad (6)$$

Коэффициенты разложения функции на 2-м участке определяются из стыковых условий в точке $x = l$ и уравнений (5). Поскольку l и h неизвестны, то определяется только их вид:

$$y_1(l) = y(l) = \frac{1}{24} l^4 - \frac{p}{720} l^6 = B_8; \\ y_1'(l) = y'(l) = \frac{1}{6} l^3 - \frac{p}{720} l^5 = B_9; \\ y_1''(l) = y''(l) = \frac{l^2}{2} - \frac{p}{24} l^4 = B_{10}; \quad (7)$$

$$y_1'''(l) = (l-p)y_1'(l) + l - h = B_{11} - h \\ y_1^{IV}(l) = y^{IV}(l) + (l-p)y_1''(l) + 1 = B_{12}; \\ y_1^V(l) = 2y_1''(l) + (l-p)y_1'''(l) = B_{13} + h(p-l); \\ y_1^{VI}(l) = 3y_1'''(l) + (l-p)y_1^{IV}(l) = B_{14} - 3h,$$

где B_i , $i = 8, 14$ — функции от l

Выражение для функции на 2-м участке

$$y_1 = B_8 + B_9(x-l) + \frac{B_{10}}{2}(x-l)^2 + \frac{B_{11}-h}{6}(x-l)^3 + \\ + \frac{B_{12}}{24}(x-l)^4 + \frac{B_{13}+h(p-l)}{120}(x-l)^5 + \frac{B_{14}-3h}{720}(x-l)^6$$

Оставшиеся три уравнения, отражающие граничные условия в точке $x = l_{CR}$, после подстановки в них полученного выражения для y_1 содержат три неизвестных l , l_c и h . Опуская промежуточные выкладки, приведем здесь выражение для h , которое явно выражается через l и l_c , и две оставшихся, нелинейных относительно l и l_c уравнения:

$$h = \frac{24}{l_c^4} \left(-B_9 - \frac{B_{10}}{2} l_c + \frac{B_{12}}{12} l_c^3 + \frac{B_{13}}{24} l_c^4 + \frac{B_{14}}{80} l_c^5 + \right.$$

$$+ \frac{s}{l} \left(-\frac{l_c}{2} + l_{CR} - \frac{3}{4} l_c \frac{l_{CR}^2}{k^2} + \frac{l_{CR}^3}{k^2} - \frac{15}{16} l_c \frac{l_{CR}^4}{k^4} + \frac{5}{8} \frac{l_{CR}^5}{k^4} \right) / (-p + l + 0,9 l_c);$$

$$B_8 + B_9 l_c + \frac{B_{10}}{2} l_c^2 + \frac{B_{11} - h}{6} l_c^3 + \frac{B_{12}}{24} l_c^4 + \frac{B_{13} + h(p - l)}{120} l_c^5 + \frac{B_{14} - 3h}{720} l_c^6 =$$

$$= r_c + s \left(\frac{l_{CR}^2}{2k} + \frac{l_{CR}^4}{8k^3} + \frac{1}{16} \frac{l_{CR}}{k^5} \right);$$

$$B_{10} + (B_{11} - h) l_c + \frac{B_{12}}{2} l_c^2 + \frac{B_{13} + h(p - l)}{6} l_c^3 + \frac{B_{14} - 3h}{24} l_c^4 =$$

$$= \frac{s}{k} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{l_{CR}^2}{k^2} + \frac{15}{8} \frac{l_{CR}^4}{k^4} \right); \quad H^* = \frac{h l_c^4}{24}$$

Изложенная методика реализуется программой *KNBK*, разработанной лабораторией наклонно направленного бурения ВНИИБТ. Программа *KNBK* предназначена для ЭВМ типа IBM PC/XT/AT и может быть использована при расчете КНБК, включающей до трех центраторов. Для проведения расчета необходимо ввести в ЭВМ следующие исходные данные: количество центраторов, диаметр долота (коронки), наружный диаметр бурильной (колонковой) трубы, внутренний диаметр бурильной (колонковой) трубы, вес единицы длины бурильной (колонковой) трубы, зенитный угол ствола скважины, величину осевой нагрузки на долото (коронку), значение диаметра центраторов или расстояния между ними. КНБК может быть рассчитана для любых восьми значений осевых нагрузок и радиусов кривизны ствола скважины. Зенитный угол, а также задаваемые значения диаметров центраторов и расстояния между ними могут изменяться с заданным шагом в выбранном интервале. КНБК может быть рассчитана для стабилизации, увеличения или уменьшения зенитного угла ствола скважины.

Результат расчета представляется в табличном виде. Программа *KNBK* предусматривает разбивку каждого участка КНБК на 11 равных частей и определение в каждой точке расстояния между осями КНБК и скважины, угла поворота сечения бурильной трубы, изгибающего момента и перерезывающей силы.