

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ СКВАЖИН ПРИ ДРОБОВОМ БУРЕНИИ

В. П. РОЖКОВ

Одним из вопросов направленного бурения является профилирование скважин, предполагающее построение проектных траекторий стволов, определение места и начальных зенитных углов заложения скважин на поверхности, нахождение точек заложения дополнительных стволов при многоствольном бурении и некоторые другие.

Для решения перечисленных вопросов при направленном бурении с использованием только одних закономерностей естественного искривления скважин необходимо выразить эти закономерности математически. Искривление скважин в вертикальной плоскости можно считать установленным, если изучено изменение их кривизны*). Кривизну отдельных отрезков скважины необходимо рассматривать в зависимости от величины зенитного угла, характеризующего этот участок, так как с его ростом увеличиваются силы, отклоняющие верхнюю часть снаряда к лежащей стенке, и тем самым увеличивается степень использования выполаживания, заложенного геологическими факторами.

Для выяснения зависимости кривизны скважины от величины зенитного угла были построены соответствующие графики для ряда месторождений: Ахтенского, Бакальского, Инского, Кусинского, Одиночного, Ольховского, Ташелгинского, Темир-Тау и Чибижекского. Численные методы анализа, примененные к этим зависимостям, показывают, что они близки к линейным и могут быть выражены уравнениями:

$$\kappa = \frac{d\theta}{dl} = a + b\theta, \quad (1)$$

где κ — кривизна скважины, град./метр;

l , θ — соответственно глубина и зенитный угол скважины;

a — условная начальная кривизна скважины, град./метр;

b — интенсивность набора кривизны с глубиной скважины, 1/метр.

Подобные зависимости были установлены А. Е. Колесниковым для Садонского и Згидского месторождений [1], о подобной же зависимости свидетельствуют графики кривизны от зенитного угла, полученные А. Г. Калининным для месторождений Горной Шории [2].

Результаты обработки зависимости кривизны от зенитного угла для анализированных нами месторождений представлены в табл. 1, обозначения в которой приняты в соответствии с формулой (1). Значения коэффициентов a и b находились по методу квантилей (3).

*) Под кривизной в данном случае понимается среднее приращение зенитного угла на интервале в один метр.

Таблица 1

№ п/п	Месторождения	Параметры корреляционной прямой		Пределы зенитных углов, для которых вычислены параметры $\bar{a}$ и $\bar{b}$, в град.	
		$1000 \cdot \bar{a}$ в $\frac{\text{град.}}{\text{метр}}$	$1000 \cdot \bar{b}$ в $\frac{1}{\text{метр}}$	от	до
1	Ахтенское	+22,2	+2,02	0	20
2	Бакальское	+19,9	+2,06	0	46
3	Инское	+2,43	+1,76	0	43
4	Кусинское	+18,5	+2,58	0	25
5	Ташелгинское	-1,99	+1,91	5	45
6	Темир-Тау	+3,65	+2,08	2	33
7	Чибижекское	+9,27	+2,03	10	29
8	Ольховское	-29,1	+5,65	10	41
9	Одиночное	-2,23	+2,97	4	44

В целях качественного опробования и точного определения границ полезного ископаемого методикой проведения геологоразведочных работ предусматривается, что скважина должна пересекать рудные тела под определенными углами. Обычно задается угол встречи (β), составленный касательной к траектории скважины в точке встречи ее с рудным телом и направлением падения этого тела. Если обозначить угол падения через α , то зенитный угол скважины в точке подсечения составит (рис. 1)

$$\Theta_{\Gamma} = \left(\alpha + \beta - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

Поместим устье скважины в начале координат так, как показано на рис. 1. В таком случае задача профилирования сводится к определению расстояния по горизонтали между точкой забурки и точкой встречи с рудным телом и зенитного угла забурки скважины.

Для решения поставленной задачи необходимо найти уравнение горизонтального и вертикального проложения скважины. Если принять за

аргумент угол наклона кривой (в нашем случае зенитный угол), то параметрические уравнения в дифференциальном виде могут быть записаны следующим образом:

$$dx = dl \cdot \cos \Theta,$$

$$dy = dl \cdot \sin \Theta.$$

Подставив в эти уравнения значение элемента длины из выражения (1) и интегрируя правые и левые части в соответствующих пределах, приходим к исходным интегральным уравнениям

$$X_i = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \cos \Theta \, d\Theta = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \frac{\cos \Theta}{a + b \Theta} d\Theta,$$

$$Y_i = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \sin \Theta \, d\Theta = \int_{\Theta_0}^{\Theta_i} \frac{\sin \Theta}{a + b \Theta} d\Theta,$$

откуда после ряда математических операций получим, соответственно,

$$X_i = \frac{1}{b} \{ \cos A [\text{Ci}(A + \Theta_i) - \text{Ci}(A + \Theta_0)] +$$

$$+ \sin A [\text{Si}(A + \Theta_i) - \text{Si}(A + \Theta_0)] \}, \quad (3)$$

$$Y_i = \frac{1}{b} \{ \cos A [\text{Si}(A + \Theta_i) - \text{Si}(A + \Theta_0)] -$$

$$- \sin A [\text{Ci}(A + \Theta_i) - \text{Ci}(A + \Theta_0)] \}, \quad (4)$$

где

X_i, Y_i — текущие координаты рассматриваемой точки искривленной скважины, соответствующие зенитному углу Θ_i , в м;
 Si, Ci — соответственно интегральный синус и косинус;
 Θ_0 — зенитный угол забурки (или верхней точки рассматриваемого участка) скважины, в град;

$A = \frac{a}{b}$ — изменяется в пределах от $-(5 \div 6)$ до 10 град.

При профилировании всегда известна глубина H_B точки B , через которую должна пройти скважина. Этим самым по существу задана величина вертикальной проекции кривой OB . С другой стороны, глубина точки B определяется уравнением (3), в котором пока еще остается неизвестным зенитный угол забурки Θ_0 . Следовательно, приравняв уравнение (3) глубине H_B , можно определить значение зенитного угла забурки. Однако решение такого уравнения является крайне сложным, так как входящие в него интегральный синус и косинус не являются элементарными функциями. Все же задача может быть решена с достаточной степенью точности, если интегральные функции заменить на определенном интервале изменения аргумента более простыми функциями.

Так как зенитные углы забурки скважин практически колеблются в небольших пределах (чаще всего от 0 до 25 градусов), то интегральные функции можно заменить более простыми, руководствуясь табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Инте- гральная функция	Аппроксимирующая функция при значении расчетного зенитного угла забурки $\Theta_{op} = (A + \Theta_0)$ равного	
	0,04—0,20 радиана	0,20—0,50 радиана
$\text{Si}(\Theta_{op})$	Θ_{op}	$0,99\Theta_{op}$
$\text{Ci}(\Theta_{op})$	$-(3,325 - 20,47 \cdot \Theta_{op} + 46,33 \cdot \Theta_{op}^2)$	$-(1,757 - 4,25 \Theta_{op} + 2,081 \cdot \Theta_{op}^2)$

После замены в уравнении (3) интегральных функций на более простые и приравнивания его глубине H_B , получим квадратное уравнение

$$f \cdot \Theta_{op}^2 - q \cdot \Theta_{op} + p = 0, \quad (5)$$

в котором

$$\Theta_{op} = \left(\frac{a}{b} + \Theta_0 \right) = (A + \Theta_0),$$

$$\rho = \left(A + \alpha + \beta - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6)$$

а значение коэффициентов определяется по табл. 3.

Т а б л и ц а 3

При значении расчетного зенитного угла забурки	
0,04—0,20 радиана	0,20—0,50 радиана
$f = 46,33 \cdot \cos A$ $q = 20,47 \cdot \cos A + \sin A$ $p = 3,325 \cdot \cos A + \sin A \cdot \text{Ci}(\rho) + \cos A \cdot \text{Ci}(\rho) - bH_B.$	$f = 2,081 \cdot \cos A$ $q = 4,25 \cdot \cos A + 0,99 \cdot \sin A$ $p = 1,757 \cdot \cos A + \sin A \cdot \text{Ci}(\rho) + \cos A \cdot \text{Ci}(\rho) - bH_B.$

При вычислении p значение интегральных функций можно рассчитывать по формулам табл. 2, но лучше определять по специальным таблицам (4).

Решив квадратное уравнение (5), можно определить по формуле (6) необходимый угол забурки, а подстановкой угла забурки в уравнение (4) — определить место заложения проектной скважины.

Пример. Найти точку и зенитный угол забурки скважины дробового бурения, если предполагаемые параметры естественного искривления $a = 0,02$ град/метр, $b = 0,002$ 1/метр и скважина должна встретить под углом $\beta = 80^\circ$ на глубине $H_B = 500$ м рудное тело, наклоненное к горизонту под углом $\alpha = 40^\circ$.

Решение. Зенитный угол забурки в точке встречи с рудным телом, определенный по формуле (2), равен 30° . Судя по величине зенитного угла и глубине точки встречи, зенитный угол забурки (расчетный), вероятно, будет в пределах 0,20—0,50 радиана. Вычисления по формулам табл. 3 дают следующие значения коэффициентов уравнения (5):

$$\rho = \left(A + \alpha + \beta - \frac{\pi}{2} \right) = 40^\circ,$$

$$f = 2,081 \cdot \cos 10^\circ = 2,0494,$$

$$q = 4,25 \cdot \cos 10^\circ - 0,99 \cdot \sin 10^\circ = 4,3573.$$

$$p = 1,757 \cdot \cos 10^\circ + \sin 10^\circ \cdot \text{Si } 40^\circ + \cos 10^\circ \cdot \text{Ci } 40^\circ - 0,002 \cdot 500 = 0,9453.$$

Для определения угла Θ_{op} необходимо решить квадратное уравнение (5)

$$2,0494 \Theta_{op}^2 - 4,3573 \Theta_{op} + 0,9453 = 0.$$

Корни этого уравнения равны $\Theta_{op1} = 1,881$ радиана и $\Theta_{op2} = 0,246$ радиана. Первый корень не может удовлетворить условиям нашего

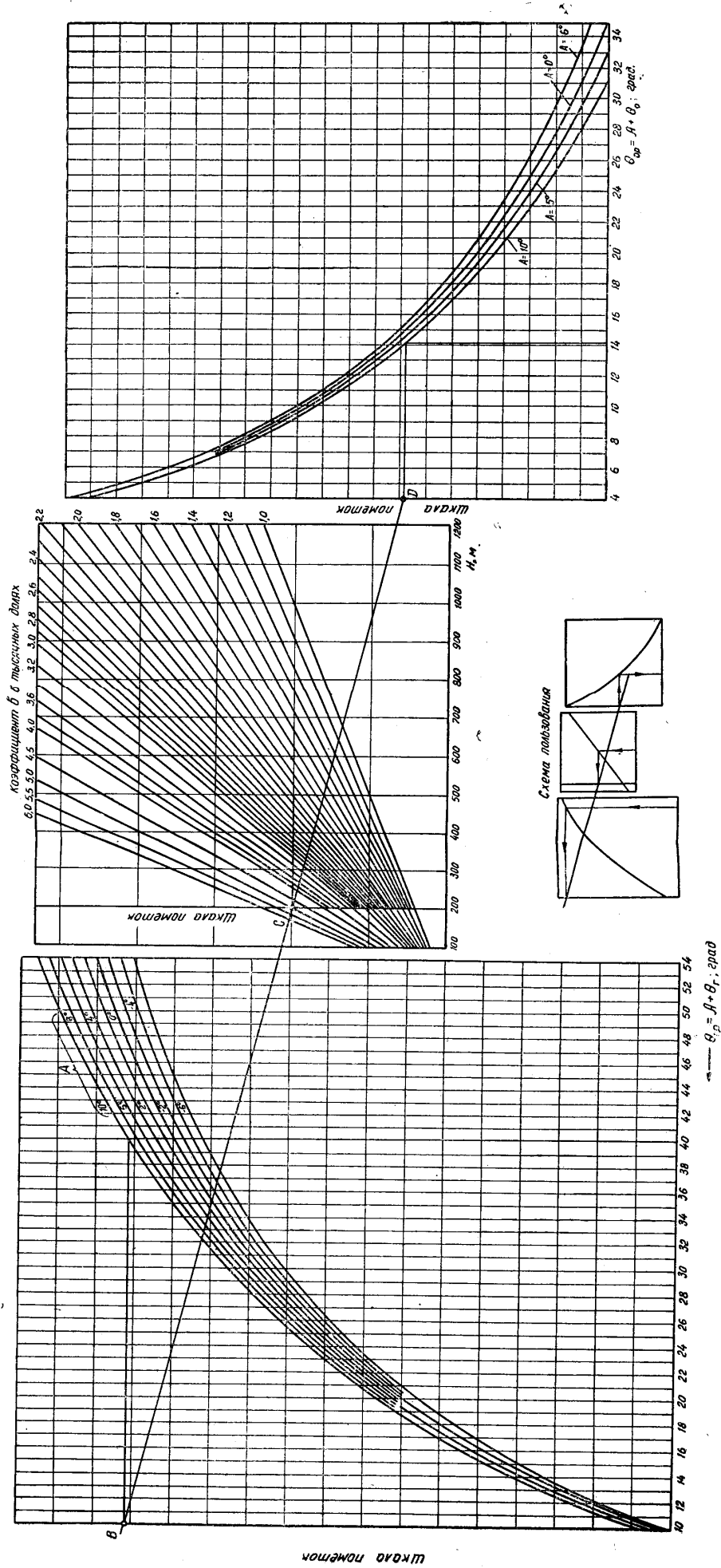


Рис. 2. Номограмма для определения расчетного зенитного угла забурки $\theta_{ор}$ (или глубины H_B) естественно искривленных скважин дробового бурения.

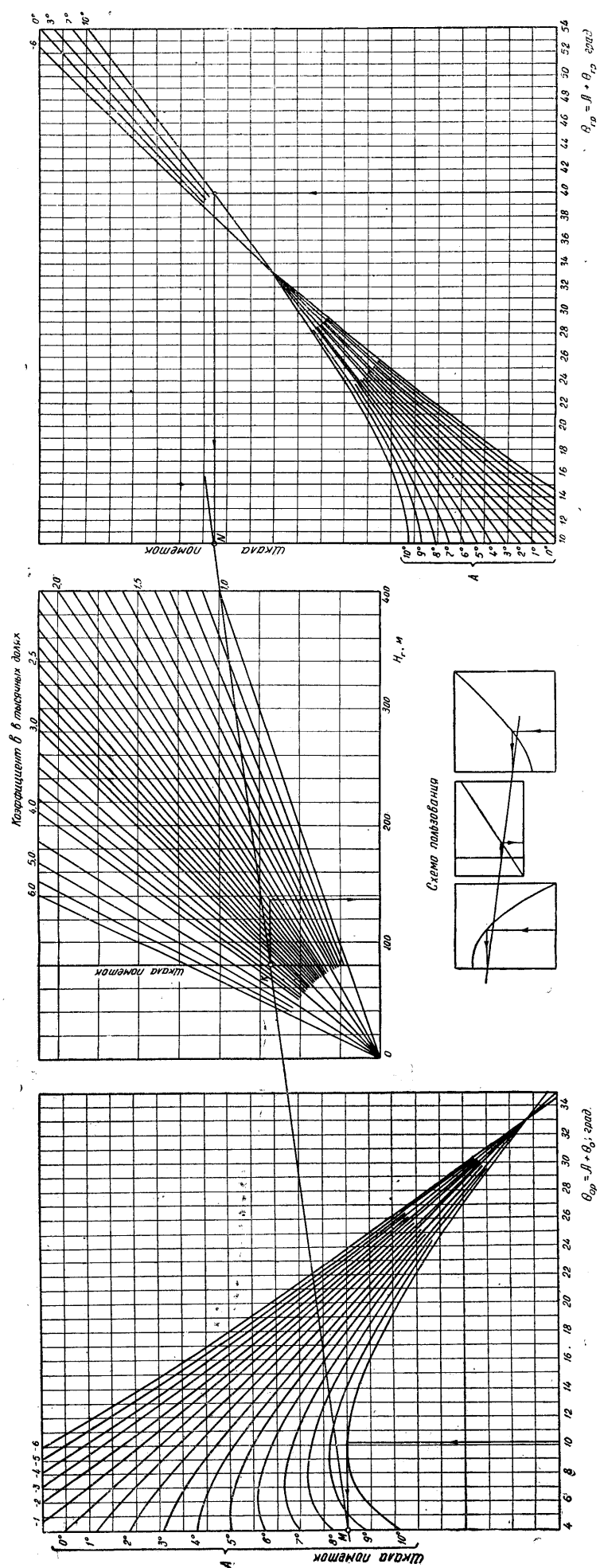


Рис. 3. Номограмма для определения длины горизонтальной проекции H_r естественно искривленной скважины дробового бурения.

примера, так как в таком случае зенитный угол забурки должен бы быть тупым. Решением квадратного уравнения является второй корень. Переходя от радианной меры к градусной, получим

$$\Theta_{\text{орград}} = 57,3 \Theta_{\text{срград}} = 14^{\circ}06'.$$

Используя уравнение (6), находим значение зенитного угла забурки скважины (действительный)

$$\Theta_0 = \Theta_{\text{ор}} - \frac{a}{b} = 4^{\circ}06'.$$

Для нахождения места заложения скважины воспользуемся уравнением (4)

$$Y_B = \frac{1}{0,002} \{ \cos 10^{\circ} [\text{Si}(40^{\circ}) - \text{Si}(14^{\circ}06')] - \\ - \sin 10^{\circ} [\text{Ci}(40^{\circ}) - \text{Ci}(14^{\circ}06')] \} = 133,6 \text{ м.}$$

Итак, скважина должна быть забурена в 133,6 м (в плане) от точки подсечения рудного тела под зенитным углом $4^{\circ}06'$.

Аналитическое профилирование с помощью уравнений (3) и (4), хотя и возможно, но все же громоздко и требует ощутимых затрат времени. Указанные неудобства могут быть преодолены, если по уравнениям (3) и (4) построить номограммы и уже с их помощью производить профилирование.

Приведа указанные зависимости к виду

$$X_i b = [\cos A \cdot \text{Ci}(A + \Theta_i) + \sin A \cdot \text{Si}(A + \Theta_i)] - \\ - [\cos A \cdot \text{Ci}(A + \Theta_0) + \sin A \cdot \text{Si}(A + \Theta_0)], \\ Y_i b = [\cos A \cdot \text{Si}(A + \Theta_i) - \sin A \cdot \text{Ci}(A + \Theta_i)] - \\ - [\cos A \cdot \text{Si}(A + \Theta_0) - \sin A \cdot \text{Ci}(A + \Theta_0)],$$

легко заметить, что по ним могут быть построены номограммы с бинарными шкалами (5), к тому же при таком представлении параметрических уравнений существенно уменьшается объем вычислительных работ при построении номограмм, так как выражения в квадратных скобках в каждом уравнении одинаковы по своей структуре. Такие номограммы представлены на рис. 2 и 3.

Пользование номограммами покажем на примере решения прежней задачи.

Зенитный угол забурки скважины определяется по номограмме на рис. 2. Для этого вычислим следующие величины

$$A = \frac{a}{b} = 10^{\circ},$$

$$\Theta_{\text{гр}} = A + \Theta_{\text{г}} = 40^{\circ}.$$

По $\Theta_{\text{гр}} = 40^{\circ}$ и $A = 10^{\circ}$ на левом графике находим точку B на шкале пометок. Аналогично на среднем графике по величинам H_B и b отыскивается точка C . Проведя через точки B и C прямую линию до пересечения со шкалой пометок правого графика, получим точку D . По этой точке и кривой, соответствующей $A = 10^{\circ}$, находим, что $\Theta_{\text{ор}} = 14^{\circ}10'$, тогда зенитный угол забурки

$$\Theta_0 = \Theta_{\text{ор}} - A = 4^{\circ}10'.$$

Величина горизонтального проложения может быть определена по номограмме на рис. 3. Для этого по $\Theta_{ор}$ и A на левом графике определяется точка M , а по $\Theta_{гр}$ и A на правом графике — точка N . Соединив эти точки прямой, получим на шкале пометок среднего графика точку K . Эта точка и луч, соответствующий значению $v = 0,002$, определяют горизонтальное проложение $H_r = 137$ м.

Таким образом, расхождения между результатами аналитического и номографического методов профилирования довольно незначительны.

Номограммы могут оказаться полезными при построении проектных искривленных скважин на разрезе. Для этого необходимо знать величины начального и конечного зенитных углов и, кроме того, задаться несколькими промежуточными значениями так, чтобы между точками получить примерно равные расстояния. Так, имеем ряд зенитных углов $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_l$. Прибавив к этому ряду величину A , получим $\Theta_{ор}, \Theta_{гр1}, \Theta_{гр2}, \dots, \Theta_{грl}$. Пользуясь последним рядом и величинами A и v как исходными данными, на средних графиках номограмм будем получать горизонтальные и вертикальные проложения точек ствола, соответствующие заданным зенитным углам, т. е. координаты отдельных точек ствола.

При профилировании скважин по предлагаемым методам необходимо иметь в виду следующее:

1. На искривление скважин оказывают влияние причины, искажающие закономерное искривление, предлагаемые же методы описывают лишь вероятные проектные траектории, поэтому вполне допустимы отклонения фактических стволов от проектных в определенных границах.

2. Номограммами и формулами нужно пользоваться поинтервально, если в разрезе скважины встречаются породы, резко отличающиеся по степени анизотропности, или скважина пересекает сложную геологическую структуру; если же скважина пересекает моноклинально залегающие слои с близкими физико-механическими свойствами, то профилировать можно сразу всю скважину.

3. При разработке данных способов профилирования имелось в виду, что скважины должны задаваться вкрест простирания структур и поэтому будут иметь сравнительно небольшие азимутальные искривления. Азимутальное отклонение до $15-20^\circ$ от первоначального направления сравнительно мало влияет на профиль скважины в вертикальной плоскости. При значительной глубине скважины даже при таких азимутальных отклонениях фактическая точка подсечения может ощутимо отклониться по горизонтали от проектной точки подсечения, что, конечно, необходимо дополнительно учитывать при профилировании.

4. Для увеличения срока службы номограмм перед использованием желательно положить их под тонкий лист органического стекла и все построения вести на стекле.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Колесников. Исследование работы гибких снарядов в процессе искусственного искривления скважин и разработка их конструкции. Автореф. кандидатской диссертации, М., 1963.
2. А. Г. Калинин. Закономерности искривления скважин на железорудных месторождениях Горной Шории. «Изв. высш. учебн. завед.», геол. и разв., № 11, 1959.
3. Г. А. Алексеев. Отыскание формы связи между случайными величинами методом квантилей. Приложение II к книге М. А. Великанова «Ошибки измерения и эмпирические зависимости», Гидрометеиздат, Л., 1962.
4. Е. Янке и Ф. Эмде. Таблицы функций с формулами и кривыми. Изд. третье. Физматгиз, М., 1959.
5. Л. Л. Гавра. Основы номографии с приложениями из машиностроения. Изд. второе. Машгиз, М.—Л., 1962.