

Ф. Ф. СОЛОВЬЕВ

О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНОВОГО И ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ НА НЕФТЬ И ГАЗ

Геодезические работы при бурении на нефть и газ имеют целью определение пространственного положения стволов скважин, характерных точек геологических разрезов и конструктивных элементов скважин, обеспечение правильного местоположения различных приборов при работах по вскрытию пласта, отбору грунтов, установление контроля за соблюдением проектного положения стволов скважин при бурении. Для выполнения этих работ производится измерение глубин, измерение углов отклонения ствола скважины от вертикали (зенитных углов), измерение направления осей скважин (азимута), ориентировка отклонителей на забое и т. д.

В литературе неполно освещены вопросы необходимой точности указанных выше измерений в скважинах при бурении на нефть и газ. В связи с этим рассмотрим отдельные элементы этих работ.

1. Измерение глубин

Измерение глубин забоя скважины в процессе бурения и после его окончания производят замером длин бурильных труб и каротажным кабелем. Измерение длин бурильных труб (свечей) осуществляют на приемном мосту дважды стальной мерной лентой или стальной рулеткой. За окончательную длину принимают среднее из двух измерений.

Расхождение результатов не должно превышать 2 см. Допустимое расхождение между двумя определениями глубины скважины до ее забоя при помощи бурильных труб не должно превышать $0,02l/n$, где n — число измеряемых свечей; l — длина свечи, м.

Средняя квадратическая ошибка в определении глубин вычисляется по разностям двойных измерений

$$m = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}}, \quad (1)$$

где d — разности между двумя замерами;

$2n$ — число парных измерений.

Точность промеров глубин каротажным кабелем определяется путем сличения перекрытых участков каротажных диаграмм, записанных одним и тем же зондом при работе с разными кабелями.

Средняя квадратическая ошибка в определении глубин каротажным кабелем также вычисляется по разностям двойных измерений.

2. Измерение углов

Измерение углов отклонения ствола скважины от вертикали (зенитного угла) и азимута в основном производится двумя типами инклинометров — приборами с магнитной стрелкой и гироскопическими. Точность инклинометров с магнитной стрелкой при малых зенитных углах низкая. Например, на объектах треста «Львовнефтегазразведка» получены следующие средние квадратические ошибки таких измерений (см. табл. 1):

Таблица 1

Ошибки измерений Измеряемые величины	Интервалы							
	0—1°		1—2°		2—5°		5°	
	<i>m</i>	$\Delta_{\text{пред}}$	<i>m</i>	$\Delta_{\text{пред}}$	<i>m</i>	$\Delta_{\text{пред}}$	<i>m</i>	$\Delta_{\text{пред}}$
Зенитные углы, мин.	$\pm 27'$	$\pm 54'$	$\pm 30'$	$\pm 60'$	$\pm 30'$	$\pm 60'$	$\pm 28'$	$\pm 60'$
Азимуты, град.	—	—	$\pm 18^\circ$	$\pm 36^\circ$	$\pm 9^\circ$	$\pm 18^\circ$	$\pm 3^\circ$	$\pm 6^\circ$

Средние квадратические ошибки определялись по разностям замеров по формуле (1).

На основании результатов произведенной обработки (сведенной в табл. 1) можно сделать следующие выводы:

- а) средняя квадратическая ошибка измерений углов отклонения от вертикали равна $\pm 30'$ и не зависит от величины угла;
- б) точность измерения азимута при углах отклонения до 1° недостаточна;
- в) точность измерения азимута при углах отклонения $1—2^\circ$ низкая;
- г) при углах отклонения более 5° точность измерения азимуты удовлетворяет существующим требованиям.

При отклонениях ствола скважины от вертикали по каждому интервалу замера определяют разность между измеренной длиной этого интервала и его проекцией на вертикальную линию. Эту разность называют поправкой за кривизну.

Возьмем отдельный интервал скважины.

Из рис. 1 видно, что

$$\Delta l = l - l \cos \Theta = 2 l \sin^2 \frac{\Theta}{2}. \quad (2)$$

Продифференцируем формулу (2) по Θ :

$$d(\Delta l) = 4 l \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} d \frac{\Theta}{2} = l \sin \Theta d \Theta.$$

Переходя к средним квадратическим ошибкам получим:

$$m_{\Delta l} = l \sin \Theta m_{\Theta}, \quad (3)$$

где l — длина интервала замера;

Θ — угол отклонения;

m_{Θ} — средняя квадратическая ошибка определения угла.

Значения $m_{\Delta l}$ при разных значениях Θ и l представлены в табл. 2.

Таблица 2

θ°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
$m_{\Delta l} \left\{ \begin{array}{l} \text{при } l = 25 \text{ м} \\ \text{при } l = 50 \text{ м} \\ \text{при } l = 100 \text{ м} \end{array} \right.$	0,004	0,008	0,011	0,015	0,019	0,022	0,026	0,030	0,034	0,038
	0,008	0,015	0,023	0,030	0,038	0,045	0,053	0,061	0,068	0,076
	0,015	0,030	0,046	0,061	0,076	0,091	0,106	0,121	0,136	0,151

θ°	11°	12°	13°	14°	15°	16°	17°	20°	30°	40°	45°
$m_{\Delta l} \left\{ \begin{array}{l} \text{при } l = 25 \text{ м} \\ \text{при } l = 50 \text{ м} \\ \text{при } l = 100 \text{ м} \end{array} \right.$	0,041	0,045	0,049	0,052	0,056	0,060	0,063	0,074	0,109	0,140	0,038
	0,083	0,090	0,098	0,105	0,112	0,120	0,127	0,149	0,218	0,280	0,308
	0,166	0,181	0,196	0,210	0,225	0,240	0,254	0,298	0,435	0,559	0,615

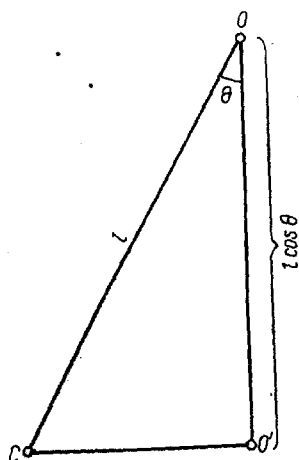


Рис. 1.

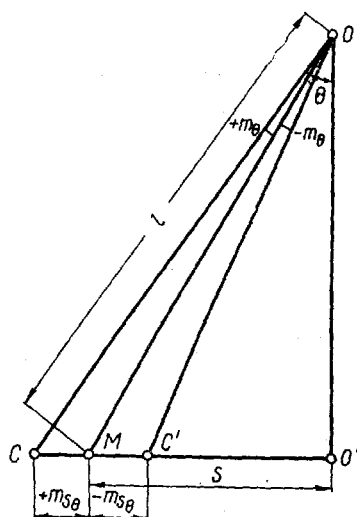


Рис. 2.

Среднюю квадратическую ошибку определения суммарной поправки за искривление отдельной скважины находят по формуле

$$m_k = \sqrt{\sum m_{\Delta l}^2} \quad (4)$$

3. Расчет ошибок определения планового положения точек ствола скважины

1) Общая ошибка планового положения точек ствола скважины зависит от ошибок измерения глубин, зенитного угла, азимута.

а) Рассмотрим ошибку планового положения точки на стволе скважины, обусловленную ошибками измерения углов и глубин.

Из рисунка 2 видно, что:

$$S = l \sin \Theta, \quad (5)$$

где S — проекция интервала на план;
 l — интервал замера;
 Θ — угол отклонения скважины от вертикали (зенитный угол).
 Продифференцируем выражение (5) по l и Θ .

$$dS = \sin \Theta dl + l \cos \Theta d\Theta.$$

Отсюда

$$m_s^2 = \sin^2 \Theta m_l^2 + l^2 \cos^2 \Theta m_\Theta^2.$$

Здесь первое слагаемое — квадрат ошибки, вызванной погрешностью измерения величины интервала; обозначим ее через m_{s_l} .

Следовательно:

$$m_{s_l} = \sin \Theta m_l. \quad (6)$$

Второе слагаемое обусловлено ошибкой измерения зенитного угла; обозначим ее через m_{s_Θ} .

Тогда

$$m_{s_\Theta} = l \cos \Theta m_\Theta. \quad (7)$$

Так как $m_\Theta = \pm 30'$ (из табл. 1), то

$$m_{s_\Theta} = l \cos \Theta \frac{m_\Theta}{\rho} = 0,0087 l \cos \Theta. \quad (8)$$

Рис. 3.

Ошибкой m_{s_l} (6) можно пренебречь, она незначительна даже при $\Theta = 45^\circ$. Например: при $l = 25$ м, $\Theta = 45^\circ$, $m_l = 0,04$ м, имеем $m_{s_l} = 0,028$ м, а $m_{s_\Theta} = 0,154$ м.

Таким образом, ошибку планового положения точки, вызванной ошибками измерения зенитных углов и глубин, можно определять по формуле (8). Величины этих ошибок для различных углов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние квадрат. ошибки	Углы отклонения	0—6°	7—15°	20—25°	30°	40°
m_{s_Θ}, M		0,22	0,21	0,20	0,19	0,15

б) Ошибка планового положения точки на стволе скважины, обусловленная ошибками измерения азимутов искривления.

Из рисунка 3 видно, что ошибка измерения азимута $\pm m_\alpha$ вызывает смещение забоя на плане по дуге AC на величину m_{s_α} .

$$m_{s_\alpha} = S \frac{m_\alpha}{\rho}. \quad (9)$$

в) Общая ошибка планового положения точки, обусловленная ошибками инклинометрических измерений.

$$m_n^2 = m_{s_\Theta}^2 + m_{s_\alpha}^2. \quad (10)$$

m_{s_n} — средняя квадратическая ошибка планового положения точки для данного интервала, а ошибка планового положения забоя или другой точки на стволе скважины определяется по формуле

$$M_{s_n} = \pm \sqrt{\sum_1^n m_{s_n}^2}. \quad (11)$$

Формула (11) рассчитана на подсчет ошибок каждого интервала последующего их суммирования. Эта работа требует значительного времени. Ее можно упростить. Для подсчета ошибок нужно сгруппировать интервалы, не отличающиеся друг от друга по величине отклонения от вертикали более 2° .

Измерения в скважине почти аналогичны положению висячего буссольного хода на поверхности земли. В геодезии А. С. Чеботарева [5] дана формула средней квадратической ошибки буссольного хода

$$M^2 = n \left\{ m_s^2 + S^2 \left(\frac{m_a}{p} \right) \right\}. \quad (12)$$

При сравнении формул (12) и (10) можно заключить, что они аналогичны. Первое слагаемое в фигурной скобке (12) $m_{s_0}^2$ — ошибка планового положения, обусловленная ошибкой измерения зенитных углов, второе слагаемое — ошибка планового положения точки на стволе скважины, обусловленная ошибкой измерения азимута направления.

2. Ошибка планового положения точки, лежащей на стволе скважины, обусловленная погрешностями графических построений.

Плановое положение точки на стволе скважины можно получить как графическим, так и аналитическим методом.

Чаще применяют графический метод, как наиболее простой и быстрый. Для нахождения проекции оси скважины на плане-инклинограмме строят круговые номограммы. В случае отсутствия номограммы точки наносятся полярным методом (по азимуту и расстоянию).

Принимая ошибку отклонения азимута и расстояния равной 0,5 мм, ошибку построения номограммы и ошибки совмещения и ориентирования инклинограммы равной 0,5 мм, получим общую ошибку элементарных графических построений.

$$m = \pm \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = \pm 0,7 \text{ мм.}$$

Средние квадратические ошибки положения точки, зависящие от ошибок графических построений, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Масштаб	1 : 100	1 : 200	1 : 400	1 : 500	1 : 1000
Ср. квадрат. ошибки					
$m_{s_{гр.}}, \text{ м}$	0,07	0,14	0,28	0,35	0,70

Ошибка планового положения забоя или другой точки на стволе скважины, обусловленная ошибками графических построений, будет:

$$M_{s_{гр}} = m_{s_{гр}} \sqrt{n}, \quad (13)$$

где n — число интервалов.

3. Суммарная ошибка планового положения забоя или другой точки на стволе скважины, обусловленная ошибками инклинометрических измерений $M_{\text{си}}$ и графических построений $M_{\text{сгр}}$, выражается формулой

$$M_s = \pm \sqrt{M_{\text{си}}^2 + M_{\text{сгр}}^2}. \quad (14)$$

4. Расчет ожидаемых ошибок планового положения забоя скважины производится по формулам (12, 13, 14).

В качестве примера произведем расчет ожидаемых ошибок для скважин, пробуренных трестом «Львовнефтегазразведка» (табл. 5).

Таблица 5

№ сква- жины	1	2	3	4	5	8	9	10	11	16	18	25
Рас- читы- ваемые величины												
Глубина, м	2735	1525	3100	2290	2950	2700	2475	2595	2675	2385	2000	2860
Количество интервалов	109	61	124	92	118	108	99	104	107	96	80	115
Смещения, м	133,9	79,8	196,7	40,8	320,7	125,1	254,5	237,6	133,5	229,4	270,2	159,9
$M_{\text{си}}, \text{ м}$	3,2	2,6	3,7	3,5	3,7	3,3	3,0	3,6	3,2	3,1	3,4	3,1
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	1,5	1,1	1,6	1,3	1,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,3	1,2	1,5
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	2,9	2,2	3,1	2,7	3,3	2,9	2,8	2,9	2,9	2,7	2,5	3,0
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	7,3	5,4	7,9	6,7	7,6	7,3	6,9	7,1	7,3	6,7	6,2	7,5
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	4,7	3,8	5,3	4,8	5,2	4,8	4,4	5,0	4,7	4,4	4,6	4,6
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	6,1	4,8	6,8	6,2	7,0	6,2	5,8	6,5	6,1	5,8	5,9	8,1
$M_{\text{сгр}}, \text{ м}$	10,5	8,0	11,6	10,2	11,3	10,6	9,9	10,7	10,5	9,8	9,6	10,6

4. Точность определения высотных отметок маркирующих горизонтов

Если обозначим:

H_y — отметку устья скважины;

L — глубину скважины;

ΔL — суммарную поправку за кривизну;

$H_{\text{мг}}$ — отметку маркирующего горизонта, то

$$H_{\text{мг}} = H_y - (L - \Delta L). \quad (15)$$

Точность определения отметки маркирующего горизонта вычисляется по формуле:

$$M_{\text{мг}} = m_y^2 + m_k^2 + m_r^2 + m_{\Delta l}^2, \quad (16)$$

где m_y — ошибка определения отметки устья скважины;

m_k — ошибка отбивки маркирующего горизонта по каротажной диаграмме;

m_r — ошибка определения глубины по каротажной диаграмме;

$m_{\Delta l}$ — ошибка определения суммарной поправки за кривизну.

Ошибка определения отметки устья скважины по формуле:

$$m_y = \pm \sqrt{\frac{[p'^2]}{n-1}},$$

где n — число пунктов, с которых вычисляется высота скважины;

p' — веса превышений, приведенных к единице;

δ — разности между урвненным и средним превышением.

По данным производственных измерений на объектах треста «Львовнефтегазразведка», $m_y = \pm 0,20$ м.

Средняя квадратическая ошибка отбивки маркирующего горизонта

$$m_k = \pm 0,3 \text{ м.}$$

Средние квадратические ошибки определения глубин по меткам на каротажном кабеле, по данным технической инструкции (2), представлены следующими величинами (табл. 6).

Таблица 6

Глубины, км	Складчатые области при мощности эксплуатацион. объектов менее 3 м и платформенные области при любой мощности, м	Складчатые области при мощности эксплуатационных объектов более 3 м
До 1 км	0,5	0,7 м
1—2	0,7	1,0 м
2—3	0,9	1,2 м
Свыше 3	1,0	1,4 м

Ошибка определения суммарной поправки за кривизну находится по формуле (4).

Средняя квадратическая ошибка отметки маркирующего горизонта для глубины 2000 м согласно формуле (16)

$$m_{\text{мг}}^2 = \sqrt{0,20^2 + 0,30^2 + 0,70^2 + 0,13^2} = \pm 0,8 \text{ м.}$$

5. Ошибки определения интервалов перфорации

Ошибки перфорации могут быть определены расчетом; они зависят от ошибки m_r — измерения глубины при каротаже, ошибки m_k — отбивки маркирующего горизонта по каротажной диаграмме, ошибки $m_{\text{пг}}$ — отмера глубины при спуске перфоратора.

Общая ошибка $M_{\text{п}}$ — определения интервалов перфорации

$$m_{\text{п}} = \pm \sqrt{m_r^2 + m_k^2 + m_{\text{пг}}^2}. \quad (17)$$

В технической инструкции (2) установлены следующие допустимые средние квадратические ошибки отмера на кабеле заданной длины при спуске перфоратора в скважину (табл. 7).

Таблица 7

Глубина, км	Средние квадратические ошибки, м
До 1	0,1
1—2	0,2
2—3	0,3
Свыше 3	0,4

Фактические ошибки определения интервалов перфорации, по данным производственных наблюдений, достигают $\pm 2m$.

Средние квадратические ошибки определения глубин и интервалов перфорации даны в табл. 8.

Таблица 8

Глубины, км	Средние квадратические ошибки определения	
	Глубин, м	Интервалов перфорации, м
До 1	0,4	0,6
1—2	0,6	0,9
2—3	0,8	1,2
Свыше 3	1,0	1,5

Например, если мощность пласта 2 м, глубина залегания — 3 км, то ошибка прострела будет в пределах ± 3 м.

Отсюда можно сделать заключение о необходимости увеличения точности перфорации. Значение средней квадратической ошибки определения местоположения перфоратора вычисляют до производства перфорации. Если значение M_n превышает допустимую ошибку вскрытия горизонтов, то в скважинах должны быть установлены радиоактивные реперы, относительно которых определяют местоположение перфораторов.

В ы в о д ы

1. Перед началом инклинометрических работ необходимо вычислить ожидаемые ошибки плано-высотного положения точек стволов скважин. Если они превышают допуски инструкций, следует уменьшить интервалы замеров и, наоборот, — увеличить последние, если ожидаемые ошибки меньше допустимых.

2. Перед обработкой инклинометрических измерений нужно произвести оценку их точности, пользуясь повторными замерами; при этом данные, не соответствующие требованиям инструкции, не следует включать в обработку.

3. Необходимо повысить точность измерения азимутов при углах отклонения до 5° путем применения гироскопических инклинометров, дающих точность измерения зенитных углов ± 30 , азимутов $\pm (4-5^\circ)$.

4. Для платформенных областей рекомендуется повысить точность определения отметок маркирующих горизонтов и водонефтяных контактов путем установки радиоактивных реперов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вопросы геологии нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, М., 1957.
2. А. Г. Калинин. Искривление буровых скважин. Гостоптехиздат, М., 1963.
3. Н. А. Кузин и Н. Н. Лебедев. Практическое руководство по городской и инженерной полигонометрии. Геодезиздат, М., 1954.
4. Техническая инструкция по топографо-геодезическим и маркшейдерским работам при поисках, разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, М., 1958.
5. А. С. Чеботарев, В. Г. Селиханович, М. Н. Соколов. Геодезия, ч. II, М., 1962.