

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЁТА ПРОФИЛЯ СТВОЛА НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ

Кондров Н.С.¹, Щевелёв А.А.² Email: Kondrov17104@scientifictext.ru

¹Кондров Никита Сергеевич – магистрант;
²Щевелёв Андрей Александрович – аспирант,
кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, горно-нефтяной факультет,
Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа

Аннотация: в статье описаны наиболее распространённые методы, применяемые для расчёта профиля ствола наклонно-направленной скважины. Рассматриваются их преимущества и недостатки. Производится расчёт плановой траектории двух скважин по данным инклинометрических исследований. Вычисление координат точек замера осуществляется автоматически, посредством построения сравнительной таблицы в программе Microsoft Excel. На основании результатов вычислений осуществляется выбор метода для промышленных расчётов, в соответствии с современными отраслевыми требованиями. Также приводится доказательство состоятельности метода минимальной кривизны при определении траектории наклонно-направленной скважины.

Ключевые слова: наклонно-направленное бурение, инклинометрия, кривизна, тангенциальный метод, сбалансированный тангенциальный метод, метод средних углов, метод радиуса кривизны, метод минимальной кривизны, ствол скважины, проектирование скважин.

DIRECTIONAL DRILLING CALCULATION METHODS REVIEW

Kondrov N.S.¹, Shchevelev A.A.²

¹Kondrov Nikita Sergeevich – master's student;
²Shchevelev Andrei Alexandrovich – PhD Candidate,
OIL AND GAS WELLS DRILLING DEPARTMENT, OIL MINING FACULTY,
UFA STATE PETROLEUM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY,
UFA

Abstract: this article analyzes the most common directional drilling calculation methods. Most of the advantages and disadvantages of these methods are taken into account. Planned trajectories of two deviated wellbores are calculated in accordance with inclination survey data. Calculation of the coordinates of survey points are provided automatically, by means of relative table in Microsoft Excel program. According to modern industrial requirements and resulting calculation data, the selection of directional calculation method is made. The article also contains the proof of minimum curvature method consistency.

Keywords: directional drilling, directional survey, tangential method, balanced tangential method, average angle method, radius of curvature method, minimum curvature method, wellbore, well design process.

УДК 622.243.2

В процессе наклонно-направленного бурения очень важно своевременно определять координаты ствола скважины, так как современные требования к сооружению скважин предполагают высокую точность при вскрытии продуктивного пласта. Кроме того, при неточном определении координат ствола скважины возможны такие аварии как: пересечение стволов скважин, что приведет к увеличению затрат на строительство скважин, а также может стать причиной нанесения вреда человеку или окружающей среде.

Современные требования к разработке месторождений предполагают плотную сетку разработки, соответственно, наиболее экономически обоснованно применять кустовое бурение. При кустовом бурении большая часть скважин являются наклонно-направленными, с близко расположенными устьями, что влечет за собой увеличение риска пересечения стволов скважин [1].

Метод минимальной кривизны является мировым отраслевым стандартом в области проектирования профиля скважин, так как признан наиболее точным. Наряду с данным методом применяют следующие: тангенциальный метод, сбалансированный тангенциальный метод, метод средних углов и метод радиуса кривизны [3].

Целью исследования является сравнительный обзор данных методов, определение их преимуществ и недостатков, а также, выявление расхождений в результатах вычислений траектории скважины различными методами.

Тангенциальный метод. Данный метод предполагает учёт только последних данных замера зенитного угла и азимута, без учёта предыдущих. При этом предполагается, что концы интервала ствола скважины

являются касательными к направлениям, задаваемым углами последнего и предыдущего замера инклинометрии. Однако, на участках искривления фактический профиль скважины не соответствует этим предположениям, так как представлен совокупностью отрезков прямых линий и не обеспечивает реального представления траектории за исключением участков стабилизации зенитного угла и азимута.

При расчёте профиля скважины по тангенциальному методу применяют следующие формулы для расчета координат точек замера:

$$\Delta x = \Delta MD \cdot \sin I \cdot \sin A, \quad (1)$$

$$\Delta y = \Delta MD \cdot \sin I \cdot \cos A, \quad (2)$$

$$\Delta z = \Delta MD \cdot \cos I, \quad (3)$$

где Δx , Δy , Δz - смещение точки замера на Восток, Север и по вертикали соответственно; ΔMD - длина интервала; I_D и A_D - соответственно зенитный угол и азимут в точке измерения.

Сбалансированный тангенциальный метод. Применение данного метода предполагает, что длина интервала между двумя последовательными точками замера делится на два отрезка прямой линии.

Таким образом, если A_1 и I_1 — азимут и зенитный угол при предыдущем замере соответственно, то:

$$\Delta x = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\sin I_1 \cdot \sin A_1 + \sin I_2 \cdot \sin A_2], \quad (4)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\sin I_1 \cdot \cos A_1 + \sin I_2 \cdot \cos A_2], \quad (5)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\cos I_2 + \cos I_1], \quad (6)$$

где I_2 и A_2 - соответственно зенитный угол и азимут в точке замера.

Этот метод заключается в разделении длины интервала на два отрезка ($\Delta MD/2$), каждый из которых является касательным к углам I_1 , A_1 и I_2 , A_2 соответственно.

Главная причина сравнительно более высокой точности вычислений при применении сбалансированного тангенциального метода заключается в том, что при вычислении траектории ствола скважины, искривляющейся в пространстве, погрешности предыдущего вычисления компенсируются текущим.

Метод средних углов. Этот метод предполагает усреднение углов, а именно, зенитного угла и азимута в двух последовательных точках замера. Кроме того, предполагают, что длина интервала равна кратчайшему расстоянию между точками.

При условии сравнительно небольшого расстояния между точками замера при сопоставлении с кривизной ствола, данный метод позволяет довольно легко, и, к тому же с достаточной степенью точности вычислить координаты ствола скважины.

В этом методе используются средние значения зенитного угла и азимута в качестве уклона и направления ствола скважины, также принимают исследуемый интервал за касательную к среднему углу.

При расчете профиля скважины методом средних углов применяют следующие формулы для расчета координат точек замера:

$$\Delta x = \Delta MD \cdot \sin I_{cp} \cdot \sin A_{cp}, \quad (7)$$

$$\Delta y = \Delta MD \cdot \sin I_{cp} \cdot \cos A_{cp}, \quad (8)$$

$$\Delta z = \Delta MD \cdot \cos I_{cp}, \quad (9)$$

где I_{cp} и A_{cp} - среднее значение зенитного угла и азимута соответственно, вычисляются по формулам (10), (11).

$$I_{cp} = \frac{I_1 + I_2}{2}, \quad (10)$$

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2}{2}. \quad (11)$$

Метод радиуса кривизны. Существо данного метода заключается в подборе цилиндра таких размеров, при которых было бы возможно расположить на его поверхности две точки замера так, чтобы интервал ствола скважины, размещенный между этими точками, был изогнут в пространстве и лежал бы на поверхности этого цилиндра.

При расчете профиля по методу радиуса кривизны применяют следующие формулы для расчета координат точек замера:

$$\Delta x = \frac{\Delta MD \cdot (\cos I_1 - \cos I_2) \cdot (\cos A_1 - \cos A_2)}{(I_2 - I_1) \cdot (A_2 - A_1)} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2, \quad (12)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta MD \cdot (\cos I_1 - \cos I_2) \cdot (\sin A_2 - \sin A_1)}{(I_2 - I_1) \cdot (A_2 - A_1)} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)^2, \quad (13)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta MD \cdot (\sin I_2 - \sin I_1)}{I_2 - I_1} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right). \quad (14)$$

Метод минимальной кривизны. В этом методе участок реальной кривой ствола скважины, расположенный между двумя последовательными точками замера эффективно заменяется сферической дугой. Таким образом, необходимо построить пространственный вектор, определяемый зенитным углом и азимутом в каждой точке замера, который бы плавно связывал дугу с этими точками, посредством коэффициента пропорциональности, определяемого кривизной интервала.

Этот метод является одним из наиболее точных среди всех применяемых при определении координат ствола скважины.

При определении положения ствола скважины методом минимальной кривизны два отрезка, полученные в результате применения сбалансированного тангенциального метода, принимают за дугу, используя коэффициент пропорциональности RF.

При расчете профиля скважины методом минимальной кривизны применяют следующие формулы для нахождения координат точек замера:

$$\Delta x = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\sin I_1 \cdot \sin A_1 + \sin I_2 \cdot \sin A_2] \cdot RF, \quad (15)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\sin I_1 \cdot \cos A_1 + \sin I_2 \cdot \cos A_2] \cdot RF, \quad (16)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\cos I_1 + \cos I_2] \cdot RF, \quad (17)$$

где RF – коэффициент пропорциональности, рассчитывается по формуле (18).

$$RF = \frac{2}{\beta} \cdot \tan \frac{\beta}{2}, \quad (18)$$

$$\cos \beta = \cos(I_2 - I_1) - \sin I_1 \cdot \sin I_2 \cdot (1 - \cos(A_2 - A_1)), \quad (19)$$

где β - угол, стягиваемый сферической дугой [2].

Для эффективного сравнения методов расчета профиля скважины произведем практический расчет профиля скважины в среде MS Excel на примере данных проектного профиля скважины A1 и интерполяции плановой траектории скважины A2.

Изображения траектории ствола скважины были получены в MS Excel на основе результатов вычисления координат каждой точки, в которой производились замеры. В качестве эталонных данных принимаются результаты, полученные методом минимальной кривизны, как самые достоверные.

Результаты представлены в таблице 1 и 2.

Расчёт траектории ствола скважины A1 методом радиуса кривизны невозможен, вследствие выхода данных за область определения.

Таблица 1. Пример расчёта траектории скважины A1

Скважина A1				Метод радиуса кривизны	Сбалансированный тангенциальный метод			
Данные замера								
MD, м	$I, ^\circ$	$A, ^\circ$	$I^*, ^\circ/100$	x, y, м	z, м	x, м	y, м	z, м
0,000	0,000	0,000	0	-	0,000	0,000	0,000	0,000
200,000	0,000	0,000	0	-	200,000	0,000	0,000	200,000
553,160	35,0	42,76	1	-	531,2	71,583	77,411	531,210
2317,89	35,32	42,76	0	-	1971,1	764,271	826,494	1971,11

0	0	0			125			7
3133,63	65,00	155,0	1	-	2583,397	1147,61	630,271	2583,38
0	0	00				0		4
3263,63	65,00	155,0	0	-	2638,337	1197,40	523,490	2638,32
0	0	00				3		4
3526,79	90,07	156,4	1	-	2692,790	1304,79	291,910	2692,77
0	0	30				5		6
4459,09	90,07	156,0	0	-	2691,651	1677,60	-	2693,91
0	0	00				7	562,602	5
Метод средних углов			Тангенциальный метод			Метод минимальной Кривизны		
x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	200,0	0,000	0,000	200,0	0,000	0,000	200,000
		00			00			
71,558	77,43	531,2	73,53	79,522	530,3	71,585	77,413	531,219
		23	5		01			
764,246	826,5	1971,	766,2	828,605	1970,	764,272	826,496	1971,12
		129	23		207			5
1147,63	630,2	2583,	1149,	626,178	2580,	1147,62	630,268	2583,40
6	94	403	517		519	1		8
1197,42	523,5	2638,	1199,	519,396	2635,	1197,41	523,487	2638,34
9	13	343	310		459	4		8
1304,82	291,9	2692,	1306,	287,356	2687,	1304,80	291,902	2692,80
5	25	797	793		867	9		1
1677,63	-	2691,	1679,	-	2686,	1677,62	-	2691,66
7	562,588	658	620	567,150	728	1	562,611	2

* - расчётная интенсивность изменения пространственного угла в интервале

Таблица 2. Пример расчета траектории скважины А2

Скважина А2								
Данные замера				Метод радиуса кривизны		Сбалансированный тангенциальный метод		
MD, м	I, °	A, °	I*, °/10м	x, y, м	z, м	x, м	y, м	z, м
0,000	0,000	0,000	0	-	0,000	0,000	0,000	0,000
1000,00	0,000	0,000	0	-	1000,000	0,000	0,000	1000,00
0								0
1300,00	30,00	0,000	1	-	1286,482	0,000	76,760	1286,47
0	0							2
2000,00	30,00	0,000	0	-	1892,697	0,000	426,760	1892,68
0	0							9
2150,00	0,000	0,000	2	-	2035,936	0,000	465,137	2035,91
0								4
2500,00	0,000	0,000	0	-	2385,936	0,000	465,137	2385,91
0								4
Метод средних углов			Тангенциальный метод			Метод минимальной Кривизны		
x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	1000,000	0,000	0,000	1000,000	0,000	0,000	1000,00
								0
0,000	76,76	1286,483	0,000	79,260	1285,802	0,000	76,762	1286,47
								9
0,000	426,7	1892,700	0,000	429,260	1892,019	0,000	426,762	1892,69
								7
0,000	465,1	2035,947	0,000	465,137	2035,914	0,000	465,143	2035,93
								6
0,000	465,1	2385,947	0,000	465,137	2385,914	0,000	465,143	2385,93
								6

Выводы

1. В результате проверки методов расчета профиля ствола скважины, содержащей участки набора зенитного угла и поворота по азимуту, а также станции замера, расположенные на расстоянии 10 м друг от друга, выяснилось, что при применении тангенциального метода для расчета профиля скважины со смещением на юго-восток, величина отхода на юг значительно завьшается, при этом снижается глубина по вертикали.

2. Применение метода средних углов и сбалансированного тангенциального метода обеспечивает приемлемую точность вычислений, при условии выполнения замера, по крайней мере, через каждые 10 метров. В противном случае, тот факт, что траектория скважины рассматривается как совокупность отрезков прямых линий, ведет к увеличению погрешности с ростом глубины по стволу.

3. Вычисление траектории типичной скважины методом радиуса кривизны практически невозможно, так как не допускается наличие интервалов стабилизации, а также искривление в плане при поддержании зенитного угла, или интервалов набора зенитного угла с удержанием постоянного азимута. Это происходит по причине того, что в процессе вычислений происходит выход функции за пределы области определения по причине деление на ноль.

4. Исходя из анализа траектории ствола скважины А2, можно заключить, что при снятии замера с интервалом 10 метров и при условии, что профиль скважины лежит в плоскости выбранный метод влияет на точность вычисления координат ствола скважины незначительно.

5. Для скважины с пространственным искривлением, вне зависимости от частоты снятия замера, предпочтительнее применять при расчётах метод минимальной кривизны, как наиболее приближенно описывающий траекторию ствола скважины, что свидетельствует о более высокой точности, по сравнению с методами, в которых траектория скважины рассматривается как совокупность отрезков прямых линий.

Список литературы / References

1. *Левинсон Л.М., Акбулатов Т.О., Левинсон М.Л., Хасанов Р.А.* Строительство и навигация сложнопрофильных скважин. Учебное пособие. Уфа, 2013. 157 с.
2. *Доровских И.В., Живаева В.В., Воробьев С.В.* Построение проектного и фактического профилей скважины: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов специальности 130504. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 50 с.: ил.
3. *Steven J. Sawaryn, John L. Thorogood.* / A Compendium of Directional Calculations Based on the Minimum Curvature Method – SPE Drilling and Completion, 2005.