

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МИНИМАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОФИЛЯ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОЙ СКВАЖИНЫ

Кондров Н.С.<sup>1</sup>, Щевелёв А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кондров Никита Сергеевич – магистрант;

<sup>2</sup>Щевелёв Андрей Александрович – аспирант,

кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, горно-нефтяной факультет,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа

**Аннотация:** в статье анализируется актуальность применения метода минимальной кривизны для расчёта профиля ствола наклонно-направленных, горизонтальных и многозабойных скважин, а также, при произведении вычислений, связанных с расчётами при наклонно-направленном бурении в полевых условиях. Доказывается состоятельность данного метода, в сравнении с другими распространёнными методами расчёта фактической траектории ствола скважины при любой частоте проведения замера инклинометрии. Обосновывается целесообразность создания алгоритма по расчёту профиля ствола скважины методом минимальной кривизны для программного обеспечения.

**Ключевые слова:** скважина, наклонно-направленное бурение, траектория, инклинометрия, КНБК, метод минимальной кривизны, инженерно-телеметрическое сопровождение, тангенциальный метод, комбинированный метод, программное обеспечение.

В современных условиях крайне важно своевременно и с достаточной степенью точности определять положение ствола нефтяных и газовых скважин при наклонно-направленном эксплуатационном бурении. Для этого применяют приборы для замера угловых и линейных параметров положения КНБК во время бурения – инклинометры, входящие в состав телеметрического оборудования. Регистрируемые инклинометрами параметры, такие как зенитный угол и азимутальный угол, в составе прочих данных передаются на поверхность для сбора и анализа. В результате измерения положения талевого блока буровой установки определяется текущая глубина по стволу – длина исследуемого интервала. Осуществляется привязка измеренных угловых параметров к линейным данным, а затем данные собирают в один список и формируют отчёт по траектории скважины. Таким образом, осуществляется управление и контроль над процессом сооружения скважин с отклонением от вертикали.

Обеспечение контроля положения ствола скважины в пространстве крайне важно в контексте оптимизации затрат на сооружение скважин, так как своевременные корректировки направления дальнейшего бурения, осуществляемые с применением современных технических и технологических средств, оказываются, в конечном итоге, гораздо выгоднее в экономическом отношении, чем организация работ по бурению вторых стволов для достижения цели на кровле продуктивного пласта. Поэтому, очень важно не допускать значительных неточностей, по крайней мере, на этапе математических вычислений.

С целью снижения рисков, связанных со строительством скважин, были разработаны различные методы расчёта траектории ствола скважины. На данный момент широко применяются пять из них, а также различные их комбинации [1].

Наиболее точным был признан метод минимальной кривизны, так как траектория скважины при его использовании представляется наиболее приближенно к реальной форме. А именно, искривленные участки представлены в данном методе в виде сферических дуг. Кроме того, формулы, применяемые в этом методе, достаточно просты и не несут в себе большого количества ограничений, связанных с выходом данных из области определения [2]. Расчёт траектории производится в Декартовой системе координат, относительно устья скважины, по следующим формулам:

$$\Delta x = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\sin I_1 \cdot \sin A_1 + \sin I_2 \cdot \sin A_2] \cdot RF, \quad (1)$$

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

$$\Delta z = \frac{\Delta MD}{2} \cdot [\cos I_1 + \cos I_2] \cdot RF, \quad (3)$$

где  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – смещение на Восток, Север и по вертикали соответственно;

$MD$  – длина интервала;

$I$  и  $A$  – зенитный угол и азимут в точке замера;

$RF$  – коэффициент пропорциональности.

$$RF = \frac{2}{\beta} \cdot \tan \frac{\beta}{2}, \quad (4)$$

$$\cos \beta = \cos(I_2 - I_1) - \sin I_1 \cdot \sin I_2 \cdot (1 - \cos(A_2 - A_1)), \quad (5)$$

где  $\beta$  - угол, стягиваемый сферической дугой [2].

Для эффективного сравнения методов расчёта профиля, примем, что замер инклинометрии осуществляется только при смене направления бурения. В результате этого длина интервала между точками замера будет составлять более 400 метров. Таким образом, разность результатов, полученных различными методами, будет максимальной.

Вычисления производятся автоматически, данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1. Пример автоматического расчёта траектории скважины

| 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    |
| 1000,000            | 0,000    | 0,000    | 0                    | -                      | 1000,000 | 0,000                                 | 0,000    | 1000,000 |
| 2000,000            | 50,000   | 45,000   | 0,5                  | -                      | 1877,822 | 270,838                               | 270,838  | 1821,394 |
| 2500,000            | 50,000   | 45,000   | 0                    | -                      | 2199,216 | 541,675                               | 541,675  | 2142,788 |
| 3300,000            | 90,000   | 45,000   | 0,5                  | -                      | 2467,309 | 1041,188                              | 1041,188 | 2399,903 |
| 4400,000            | 90,000   | 0,000    | 0,5                  | -                      | 2467,309 | 1430,097                              | 1980,097 | 2399,903 |
| 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    | 1000,000 |
| 161,729             | 390,448  | 1906,308 | 541,675              | 541,675                | 1642,788 | 289,444                               | 289,448  | 1877,822 |
| 432,567             | 661,285  | 2227,701 | 812,512              | 812,513                | 1964,181 | 560,281                               | 560,281  | 2199,216 |
| 964,137             | 1192,856 | 2501,318 | 1378,198             | 1378,198               | 1964,181 | 1081,122                              | 1081,122 | 2467,309 |
| 1385,089            | 2209,124 | 2501,318 | 1378,198             | 2478,198               | 1964,181 | 1491,338                              | 2071,470 | 2467,309 |

\* - расчётная интенсивность изменения пространственного угла в интервале.

Выводы:

Метод минимальной кривизны признан наиболее точным, результаты расчётов остальных исследуемых методов следует сравнивать с результатами, полученными методом минимальной кривизны. Сравним результаты, показанные в таблице № 1, положения точек ствола скважины x, y и z, разность показателя глубины по вертикали достигает порядка сотен метров. Задав всего 5-6 строк с параметрами глубины, зенитного угла и азимута, можно спроектировать скважину по методу минимальной кривизны, изменение угловых параметров с заданием направления с постоянной интенсивностью, в данном случае это интервалы вертикального участка, набора зенитного угла, стабилизации, выхода на горизонтальный участок, поворот по азимуту и горизонтальный участок. Можно сделать вывод, что для оперативных проектных расчетов профиля очень удобен и точен метод минимальной кривизны при построении траектории, с заданием направления с постоянной пространственной интенсивностью. Применение тангенциального метода, сбалансированного тангенциального и метода средних углов для этих целей возможно при сокращении интервала замеров инклинометрии, по крайней мере, до 10 метров. Метод радиуса кривизны подходит только для расчёта интервалов с искривлением в двух плоскостях, иначе данные выходят за область определения, так как возникает деление на ноль.

В полевых условиях, когда расстояние между точками замера гораздо меньше обозначенных в данной статье пределов, для оперативных расчётов по прогнозированию угловых параметров в пределах небольших, до 10 метров, интервалов инженер-технолог по наклонно-направленному бурению может применять и другие методы, описываемые в данной статье. Однако, принятие решений в перспективе длинных интервалов может осуществляться только согласно расчёту траектории по методу минимальной кривизны.

Разработка алгоритма по расчёту профиля ствола скважины методом минимальной кривизны для программного обеспечения обоснована необходимостью снижения затрат на проектирование строительства скважины.

#### ***Список литературы***

1. *Доровских И.В., Живаева В.В., Воробьев С.В.* / Построение проектного и фактического профилей скважины: методические указания. Самара: СГТУ, 2010 г. 50 с.: ил.
2. *Кондров Н.С.* / Обзор методов расчёта профиля ствола скважины // Проблемы современной науки и образования. № 22 (104) / изд-во Проблемы науки, 2017. 10 с.