

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ухтинский государственный технический университет»
(УГТУ)

РАСЧЁТ И КОРРЕКТИРОВАНИЕ ТРАКТОРИИ
СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ

Методические указания

Ухта, УГТУ, 2014

УДК 622.243.2(075.8)

ББК 33.131 я7

Б 69

Близнюков, В. Ю.

Б 69 Расчёт и корректирование траектории скважины при бурении [Текст] : метод. указания / В. Ю. Близнюков, А. С. Повалихин, С. А. Кейн. – Ухта : УГТУ, 2014. – 36 с.: ил.

Методические указания предназначены для изучения дисциплин «Математическое обеспечение задач наклонно направленного бурения» и «Технология бурения нефтяных и газовых скважин». Содержание указаний полностью соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту по подготовке магистров направления 131000 – Нефтегазовое дело.

Методические указания также предназначены работникам нефтяной и газовой промышленности, аспирантам и студентам нефтегазовых вузов.

В методических указаниях изложены методы расчёта координат и траекторных параметров фактического профиля ствола наклонных и горизонтальных скважин, представлены формулы для корректирования траектории бурения с целью выведения ствола скважины в точку с заданными координатами.

Приведены примеры расчёта траектории бурения наклонной скважины.

УДК 622.243.2(075.8)

ББК 33.131 я7

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры бурения 10.01.2014, протокол №01.

Рецензент: В. И. Кучерявый, профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин ФГБОУ ВПО «УГТУ», д.т.н.

Корректор: К. В. Коптяева.

Технический редактор: Л. П. Коровкина.

План 2014 г., позиция 380.

Подписано в печать 30.04.2014. Компьютерный набор.

Объем 36 с. Тираж 100 экз. Заказ №284.

© Ухтинский государственный технический университет, 2014

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

Типография УГТУ.

169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Октябрьская, д. 13.

1. Основные положения

Задачи расчёта координат и параметров фактического профиля скважины:

- определение фактической глубины по вертикали забоя скважины;
- контроль траектории скважины при бурении и точности реализации проектного профиля скважины;
- предупреждение пересечения со стволом соседних скважин;
- определение закономерностей искривления ствола скважины;
- оценка интенсивности искривления ствола скважины;
- управление забойным двигателем-отклонителем для корректирования траектории ствола скважины.

2. Система географических координат

Система географических координат необходима для идентификации положения точки на Земле. Для этого поверхность Земли мысленно покрывают сетью линий, которые называются меридианами и параллелями (рисунок 2.1).

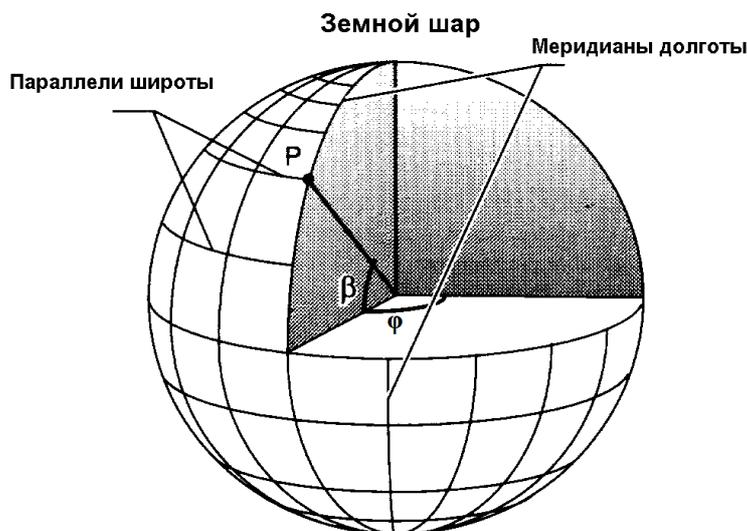


Рисунок 2.1 – Система географических координат

Параллели широты образуются окружностями, опоясывающими земной шар и плоскости которых перпендикулярны оси вращения Земли. Если окружности вычерчиваются на поверхности сферы через равные промежутки, разделяя на 90 частей расстояние между экватором и каждым полюсом Земли, то каждый такой промежуток называется градусом широты. Окружности нумеруются от 0° на экваторе до 90° на полюсе. Каждый градус делится на 60 минут, и каждая минута делится на 60 секунд дуги окружности.

Географической широтой точки на земной поверхности считается угол β , образуемый отвесной линией, проходящей через данную точку, с плоскостью экватора (рисунок 2.1).

Меридианы долготы образуются серией воображаемых линий, которые пересекаются как на северном, так и на южном полюсах, а также пересекаются с линиями широты под прямым углом и делят экватор на 360 равных частей. Это и приводит к разделению долготы на 360 градусов. В свою очередь, каждый градус разделяется на 60 минут, а каждая минута – на 60 секунд. Гринвичский меридиан, проходящий через центр измерительного инструмента Гринвичской обсерватории, считают начальным меридианом долготы, установив, что долгота должна отсчитываться от этого меридиана в двух направлениях по 180° , причём восточная долгота должна быть положительной (с плюсом), а западная – отрицательной (с минусом).

Географической долготой точки на земной поверхности называется угол φ между плоскостями начального меридиана и меридиана данной точки (рисунок 2.1).

3. Основные положения картографии

Изображая земную поверхность на карте, вначале переходят от физической её формы к математической, которую представляют в виде поверхности эллипсоида или шара, а затем уже математическую поверхность изображают на плоскости. Поскольку объёмную поверхность невозможно изобразить на плоскости без искажений и разрывов, то при изображении земной поверхности на плоскости принимают условия, позволяющие учитывать эти искажения. Такие условные изображения на плоскости земной поверхности называют картографическими проекциями. Картографические проекции строятся по математическому закону, определяющему их вид.

Если земную поверхность спроектировать на боковую поверхность цилиндра, а затем развернуть последнюю на плоскость, то получим прямую цилиндрическую проекцию (рисунок 3.1).

Проекцию часто определяют не по способу её геометрического построения, а по виду изображённых на ней параллелей и меридианов, т. е. по виду картографической сетки (например коническая проекция – картографическая проекция, в которой параллели – дуги концентрических окружностей, а меридианы – прямые, сходящиеся в центре этих окружностей).

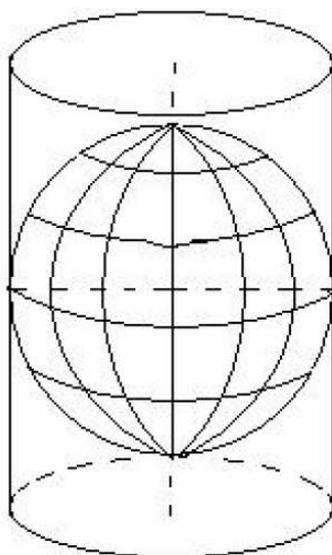


Рисунок 3.1 – Схема получения цилиндрической поверхности Земли

Для изображения территории нашей страны на топографических картах принята конформная (равноугольная) проекция Гаусса, которая представляет собой поперечную цилиндрическую проекцию.

В конформной картографической системе Гаусса вся поверхность земного шара делится на зоны по 6° (или 3°) долготы и 8° широты между 84° северной и 80° южной широтами. Для полярных районов применяются другие, специальные, проекции.

Выбор в 6° или 3° долготы зависит от масштаба составляемой карты. При составлении карты в масштабе 1:10 000 и мельче берутся зоны 6° , а при составлении карт масштаба 1:5 000 и крупнее берутся зоны 3° . Шестиградусные зоны по своему расположению совпадают с колоннами карты масштаба 1:1 000 000 и нумеруются арабскими цифрами, начиная от гринвичского меридиана, с запада на восток. Так как западная граница первой зоны совпадает с гринвичским меридианом, то долготы осевых меридианов зон будут 3° , 9° , 15° , 21° и т. д.

Каждой такой зоне присваивается обозначение в виде сочетания буквы латинского алфавита (буквы I и O – пропускаются) и цифры. Таким образом, положение зоны по широте соответствует буквенному обозначению, а по долготе – числу.

Средний меридиан каждой зоны называется осевым. Осевой меридиан и экватор в проекции Гаусса изображаются взаимно перпендикулярными линиями, а остальные меридианы – кривыми линиями, сходящимися в полюсах. Параллели изображаются кривыми линиями, выпуклостями, обращёнными к экватору (рисунок 3.2). Линии, параллельные изображениям осевого меридиана

и экватора, образуют прямоугольную координатную сетку. На карте положение точки задаётся координатами X и Y . Ось X направлена по широте, ось Y – по меридиану. В каждой зоне конформной картографической системы только центральная ось Y направлена на географический Север.

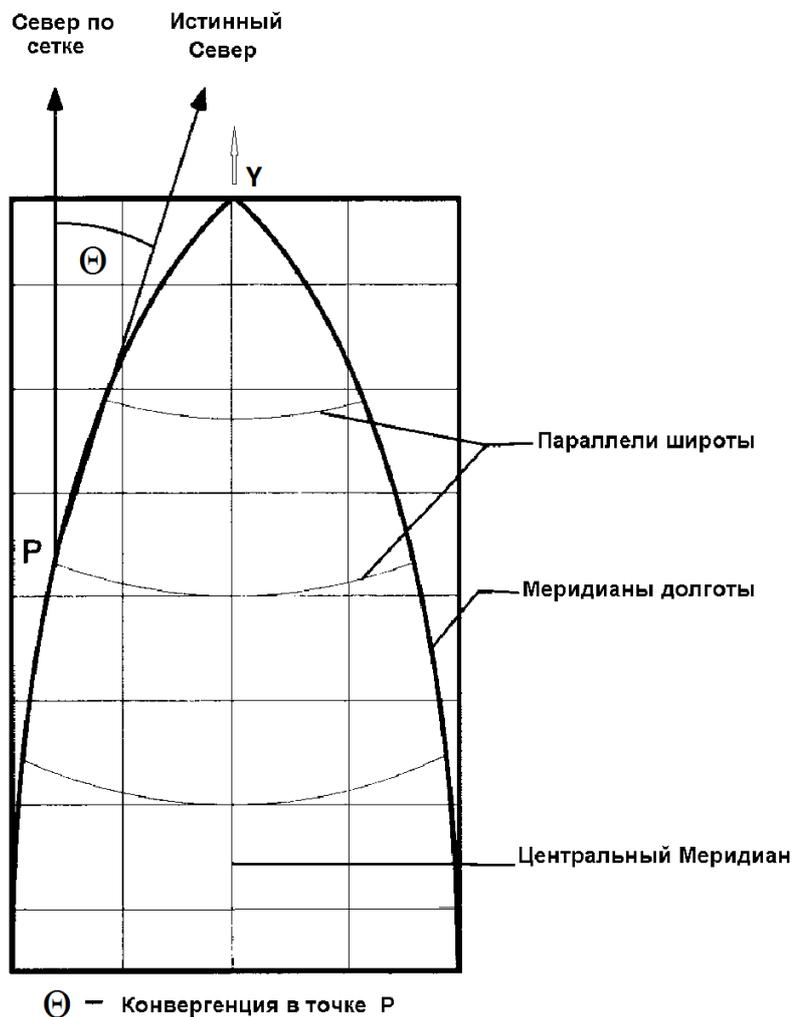


Рисунок 3.2 – Схема координат картографической зоны

Ширина каждой зоны на экваторе приблизительно равна 600 км, сужаясь по мере приближения к полярным областям, поэтому, чтобы избежать употребления отрицательных величин при обозначении удаления к востоку, центральному меридиану каждой зоны, независимо от её удаления к востоку, присваивается величина 500 км.

Для точек, удалённых к северу от экватора, величина смещения на север измеряется напрямую в метрах, начиная от 0 на экваторе и возрастающая по мере удаления на север. Во избежание отрицательных величин при обозначении удаления от экватора в южном полушарии экваториальной линии присваивается величина 10 000 км, и удаление на юг в южном полушарии измеряется уменьшающимися, но положительными величинами по мере их удаления.

Конвергенцией Θ называется разница между направлением на Север по сетке и истинным Севером. Ясно, что на центральном меридиане направление по сетке на Север совпадает с истинным направлением. Конвергенция – отрицательна для Востока и положительна для Запада.

Азимут (истинным и магнитным) направления (линии) называют горизонтальный угол, отсчитываемый от северной стороны меридиана по ходу часовой стрелки до данного направления (линии).

Истинный азимут линии равен её магнитному азимуту плюс величина восточного склонения или минус величина западного магнитного склонения (на территории России восточное склонение).

Угол, отсчитываемый от северного направления осевого меридиана или линии, ему параллельной, по ходу часовой стрелки до данной линии называется дирекционным углом.

4. Система координат в бурении

В качестве основной системы координат, в которой задаётся проектное положение забоя скважины, рассчитываются координаты проектного и фактического профиля, принята система координат, связанная с направлением магнитного меридиана и направлением силы земного тяготения. Это прямоугольная система координат, где ось X является касательной к магнитному меридиану в направлении магнитного севера, ось Y направлена в сторону магнитного востока, а ось Z – вертикально вниз.

При переходе истинных географических координат к условным географическим координатам учитывается угол конвергенции ($\pm\Theta_{\text{кон}}$), а к магнитным – магнитное склонение ($\pm\varphi_{\text{скл}}$). Знак (+) принимается для восточной конвергенции и магнитного склонения, а знак (–) – для западной конвергенции и магнитного склонения.

Магнитное склонение – угол между магнитным и географическим меридианами в данной точке земной поверхности (рисунок 4.1).

Поскольку Земля не является правильным геометрическим телом, то в геодезии введено понятие уровенной поверхности, которую можно представить как поверхность воды океана в спокойном состоянии, мысленно проложенную под сушей. Эта уровенная поверхность называется поверхностью геоида. Уровенная поверхность обладает следующим свойством: она является выпуклой поверхностью, перпендикулярной к направлению силы тяжести (отвесной линии) в каждой своей точке. Поверхность, обладающую таким

свойством, можно провести через любую точку отвесной линии, и эта поверхность называется уровенной поверхностью этой точки.



Рисунок 4.1 – Схема учёта магнитного склонения

Длина отвесной линии от уровенной поверхности до точки на поверхности или в глубине Земли называется абсолютной высотой и глубиной точки соответственно. В бурении численное значение глубины точки в метрах называется её абсолютной отметкой.

В бурении глубина скважины рассчитывается с учётом альтитуды устья скважины, другими словами, с учётом высоты расположения устья скважины над уровенной поверхностью.

Проектирование скважин обычно осуществляется по координатам сетки карты и, поэтому направления будут «привязаны» к ним. Однако датчики системы телеметрии, работающие в скважине, «привязаны» на истинный или магнитный Север. Специалист по направленному бурению обязан уметь преобразовывать эти системы координат из одной в другую.

Маркшейдерской службой определяются географические (истинные) координаты (X_G , Y_G) устья скважины, которые являются нулевой точкой при расчёте координат проектного или фактического профиля скважины.

Для многозабойных скважин может использоваться относительная система координат с началом отсчёта в точке забуривания бокового ответвления.

Для расчёта истинной глубины (координата Z) должны быть заданы:

- Z_P – альтитуда стола ротора;
- Z_{II} – альтитуда пола буровой установки на морском основании или буровой платформе.

В зависимости от используемой системы координат и решаемых задач ось X может быть направлена на истинный географический Север, магнитный Север, условный Север, который совпадает с направлением координатной сетки в точке бурения.

5. Принципы измерений траекторных параметров ствола скважины

При проведении исследований в стволе скважины с помощью современных устройств (инклинометров или телесистем), которые снабжены магнитными и гравитационными датчиками азимута и датчиками зенитного угла, измеряют азимут и зенитный угол в каждой точке ствола скважины (рисунок 5.1), а также расстояние между точками (на рисунке 5.1 точки 1 и 2) измерений.



Рисунок 5.1 – Схема измерений параметров искривления ствола скважины

Датчики азимута бывают гироскопическими и магнитными и измеряют истинный и магнитный азимут соответственно.

Гравитационные датчики позволяют найти направление вектора силы тяжести и подразделяются на две основные группы:

- различные типы физического маятника;
- датчики, которые реагируют на величину ускорения, а именно – ускорение свободного падения, так называемые акселерометры.

6. Методы расчёта координат ствола скважины

6.1. Основные положения

При проводке наклонной или горизонтальной скважины траектория бурения может не совпадать с проектным профилем скважины. Основная задача технологии направленного бурения при этом заключается в оперативном расчёте величины и направления отклонения фактического профиля от проектного и корректирование траектории бурения.

Помимо решения основной задачи по контролю и управлению траекторией бурения, расчёт пространственных координат и параметров фактического профиля необходим для:

- исследования формы пространственно искривлённого ствола скважины с целью уточнения условий работы компоновок низа бурильной колонны;
- определения условий прохождения по стволу скважины бурильных и обсадных колонн;
- разработки мероприятий по предупреждению образования желобов в стенке ствола скважины;
- определения интервалов изнашивания обсадных колонн в процессе эксплуатации скважины.

Технология инклинометрии предусматривает измерение в каждой точке ствола скважины зенитного угла (α) и азимута (φ), а также длины ствола от устья скважины до каждой точки измерения. Задача расчёта траектории бурения состоит в том, чтобы на основании измерений рассчитать координаты точек измерения в прямоугольной системе координат, связанной с устьем скважины, с точкой забуривания бокового ствола или с другой реперной точкой. Другими словами, расчётным способом определить вертикальную глубину (Z) точки измерения, а также горизонтальные её смещения (X и Y) в направлении Север-Юг с положительным направлением на Север и в направлении Восток-Запад с положительным направлением на Восток.

Проекции (dx , dy , dz) элементарного интервала (dl) ствола скважины на координатные оси (рисунок 6.1):

$$\begin{aligned} dx &= dl \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi; \\ dy &= dl \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi; \\ dz &= dl \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Приращения координат (Δx , Δy , Δz) ствола скважины за интервал (Δl) между точками измерений определяются путём интегрирования элементарных приращений по длине интервала.

$$\Delta x = \int_0^{\Delta l} \sin \alpha(l) \cdot \sin \varphi(l) dl;$$

$$\Delta y = \int_0^{\Delta l} \sin \alpha(l) \cdot \cos \varphi(l) dl;$$

$$\Delta z = \int_0^{\Delta l} \cos \alpha(l) dl.$$
(6.2)

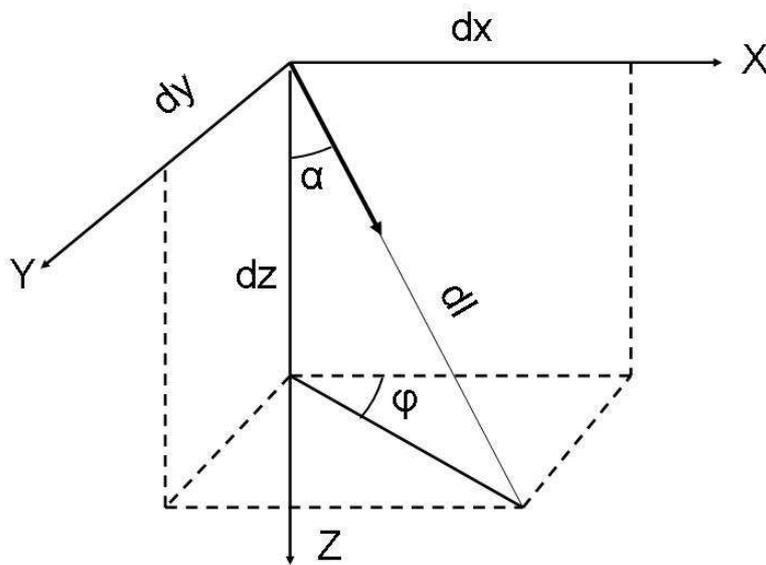


Рисунок 6.1 – Схема определения приращений координат

Поскольку известны значения функций $\alpha(l)$ и $\varphi(l)$ только в точках измерения, то в используемых методах вычисления координат траектории бурения задаётся либо закономерность изменения зенитного угла и азимута, либо геометрия самого интервала или используются сглаженные зависимости изменения зенитного угла и азимута. Таким образом, метод расчёта координат ствола скважины по данным инклинометрических измерений определяется указанными допущениями.

В простейших методах для расчёта приращений координат ствола скважины используются результаты измерения зенитного угла и азимута в двух соседних точках. В более точных методах используются результаты измерений в трёх и более точках, что позволяет уменьшать ошибку при построении фактического профиля ствола скважины при использовании одних и тех же измерительных средств.

6.2 Метод среднего угла

В данном методе интервал (L_{1-2}) ствола скважины между соседними точками измерений представляется отрезком прямой. При этом зенитный угол и азимут на протяжении данного интервала принимается равным средним арифметическим значениям соответствующих углов по концам интервала.

Приращения координат определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\Delta x &= L_{1-2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}; \\ \Delta y &= L_{1-2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}; \\ \Delta z &= L_{1-2} \cdot \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},\end{aligned}\tag{6.3}$$

где α_1, α_2 – зенитный угол в верхней и нижней точке измерения соответственно, градус;

φ_1, φ_2 – азимут в верхней и нижней точке измерения соответственно, градус.

6.3 Метод минимума кривизны и метод кольцевых дуг

В методе расчёта по минимуму кривизны интервал ствола скважины между точками измерений представляется в виде пространственно расположенной дуги окружности. При построении траектории ствола пространственная кривая сглаживается с использованием относительного коэффициента, величина которого зависит от кривизны исследуемого участка ствола. За счёт такого сглаживания сводится к минимуму общая кривизна дуги в пределах интервала ствола между точками измерений.

Метод кольцевых дуг, по сравнению с методом радиуса кривизны, обеспечивает более плавную стыковку участков траектории ствола. При этом исключаются скачкообразные изменения направления касательного вектора \bar{V} в точках измерения.

Положение плоскости, в которой расположена дуга окружности, определяется известными зенитными азимутальными углами в точках измерения. Дуги расположены таким образом, чтобы касательные векторы в точках измерения были касательными к проводимым дугам.

Радиус дуги определяют из условия равенства длины дуги и ствола скважины между точками измерения. При этом каждый интервал измерения

определён ориентацией наклонной плоскости, в которой расположена дуга окружности, аппроксимирующая данный интервал, и радиус кривизны последней (рисунок 6.2).

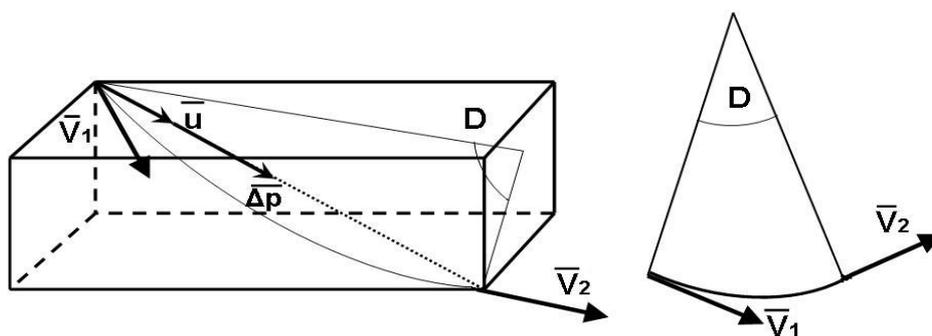


Рисунок 6.2 – Схема расчёта координат ствола скважины по методу кольцевых дуг

Приращения координат (ΔY , ΔX , ΔZ) вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\Delta Y &= T \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1 + \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2); \\ \Delta X &= T \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2); \\ \Delta Z &= T \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2),\end{aligned}\tag{6.4}$$

где $T = \frac{180 \cdot L_{1-2} \cdot \operatorname{tg} \frac{D}{2}}{\pi \cdot D};$

$$D = \arccos(\sin \alpha_1 \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \varphi_2 + \sin \alpha_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \varphi_2 + \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2);$$

α_1 , α_2 – зенитный угол в верхней и нижней точке измерения соответственно, градус;

φ_1 , φ_2 – азимут в верхней и нижней точке измерения соответственно, градус.

Угол ($\Delta \gamma_{1-2}$) пространственного искривления ствола скважины на интервале 1-2, равный углу поворота касательной к оси бокового ствола скважины на рассматриваемом интервале, рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}\Delta \gamma_{1-2} &= \\ &= \arcsin \sqrt{[\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2]^2 + \sin^2 \alpha_2 \cdot \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1)}.\end{aligned}\tag{6.5}$$

Угол (β_{1-2}) ориентации искривления – это угол между апсидальной (вертикальной) плоскостью и плоскостью искривления оси ствола скважины на интервале 1-2:

$$\beta_{1-2} = \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha_1 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}. \quad (6.6)$$

Угол (β_{1-2}) ориентации искривления отсчитывается в нормальной плоскости (перпендикулярной к касательной плоскости) по направлению движения часовой стрелки от верхней до главной нормали. Этот угол характеризует ориентацию плоскости, в которой расположен участок скважины между точками измерений. На участке бурения забойным двигателем-отклонителем угол ориентации равен фактическому углу установки забойного двигателя-отклонителя.

Интенсивность (i_{1-2}) искривления ствола скважины на интервале между точками измерений:

$$i_{1-2} = \frac{10 \cdot \Delta\gamma_{1-2}}{L_{1-2}}, \quad (6.7)$$

где i – интенсивность искривления на участке, градус/10 м.

Радиус (R_{1-2}) кривизны ствола скважины между точками измерений рассчитывается по формуле:

$$R_{1-2} = \frac{180 \cdot L_{1-2}}{\Delta\gamma_{1-2}}. \quad (6.8)$$

Метод минимума кривизны широко применяется в современной практике бурения для расчёта координат наклонно направленных и горизонтальных скважин.

6.4 Пример расчёта координат и траекторных параметров фактического профиля скважины

Условия расчёта:

- интервал инклинометрических измерений 1500-2200 м;
- координаты ствола скважины на глубине 1500 м в координатах восток-север: $Y_A = 60$ м; $X_A = 246$ м; $Z_A = 1473$ м;
- зенитный угол на глубине 1500 м равен 14,5 град.;
- магнитный азимут – 102 град.

Измерение зенитного угла и азимута ствола скважины проводили в интервале 1500-2200 м с помощью инклинометра с магнитным датчиком азимута.

Таблица 6.1 – Результаты измерений зенитного угла и магнитного азимута в интервале 1500-2200 м

Номер замера, п/п	Длина ствола, м	Зенитный угол, град.	Азимут, град.
1	1500	14,50	102
2	1600	15,00	105
3	1700	15,75	105
4	1800	16,50	108
5	1900	17,00	108
6	2000	18,00	110
7	2100	18,50	110
8	2200	19,00	110

В таблице приведены результаты инклинометрии интервала 1500-2200 м.

При известных координатах (X_1, Y_1, Z_1) начальной точки 1 координаты (X_2, Y_2, Z_2) точки 2 вычисляются по формулам (6.4).

На первом этапе определяются параметры D и T .

$$D = \arccos(\sin 14,5 \cdot \sin 102 \cdot \sin 15,0 \cdot \sin 105 + \sin 14,5 \cdot \cos 102 \cdot \sin 15,0 \cdot \cos 105 + \cos 14,5 \cdot \cos 15,0) = 1,18.$$

$$T = \frac{180 \cdot 100 \cdot \operatorname{tg} \frac{1,18}{2}}{\pi \cdot 1,18} = 50,02.$$

$$Y_2 = 60 + 50,02 \cdot (\sin 14,5 \cdot \sin 102 + \sin 15,0 \cdot \sin 105) = 84,8 \text{ м.}$$

$$X_2 = 246 + 50,02 \cdot (\sin 14,5 \cdot \cos 102 + \sin 15 \cdot \cos 105) = 240,1 \text{ м.}$$

$$Z_2 = 1473 + 50,02 \cdot (\cos 14,5 + \cos 15,0) = 1569,7 \text{ м.}$$

Аналогично определяются координаты для каждой последующей точки измерений. Результаты расчёта заносятся в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Фактический профиль в координатах Восток-Север

Номер замера, п/п	Длина ствола, м	Зенитный угол, град.	Азимут, град.	Координаты фактического профиля		
				Y, м	X, м	Z, м
1	1500	14,50	102	60,0	246,0	1473,0
2	1600	15,00	105	84,8	240,1	1569,7
3	1700	15,75	105	110,4	233,2	1666,1
4	1800	16,50	108	137,0	225,3	1762,2
5	1900	17,00	108	164,4	216,4	1858,0
6	2000	18,00	110	192,8	206,6	1953,3
7	2100	18,50	110	222,2	195,9	2048,3
8	2200	19,00	110	252,4	184,9	2143,0

На основании данных таблицы 6.2 рассчитывается смещение (A_i) по горизонтали i -ой точки профиля от устья скважины, а также азимут (ψ_i) смещения по формулам (6.9 и 6.10):

$$A_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}; \quad (6.9)$$

$$A_1 = \sqrt{246^2 + 60^2} = 253,21 \text{ м};$$

$$A_2 = \sqrt{240,1^2 + 84,8^2} = 254,57 \text{ м};$$

$$\psi_i = \operatorname{arctg} \frac{X_i}{Y_i}; \quad (6.10)$$

$$\psi_1 = \operatorname{arctg} \frac{60}{246} = 13,71 \text{ град.};$$

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{84,8}{240,1} = 19,44 \text{ град.}$$

Угол ($\Delta\gamma_{1-2}$) пространственного искривления ствола скважины на интервале 1-2, равный углу поворота касательной к оси ствола скважины на рассматриваемом интервале, рассчитывается по формуле (6.5):

$$\begin{aligned} \Delta\gamma_{1-2} &= \\ &= \arcsin \sqrt{[\sin 15 \cdot \cos 14,5 \cdot \cos(105 - 102) - \sin 14,5 \cdot \cos 15]^2 + \sin^2 15 \cdot \sin^2(105 - 102)} = \\ &= 0,913 \text{ град.} \end{aligned}$$

Угол (β_{1-2}) ориентации искривления профиля на участке между точками 1-2 определяется по формуле 6.6:

$$\beta_{1-2} = \operatorname{arctg} \frac{\sin 14,5 \cdot \sin(105 - 102)}{\sin 15,0 \cdot \cos 14,5 \cdot \cos(105 - 102) - \sin 14,5 \cdot \cos 15,0} = 58,25 \text{ град.}$$

В данном примере интервал между точками измерений равен 100 м, поэтому, как это следует из формулы (6.7), интенсивность искривления ствола скважин в градусах на 10 м равна:

$$i_{1-2} = \frac{\Delta\gamma_{1-2}}{10} = \frac{0,913}{10} = 0,0913 \text{ град./10м.}$$

Аналогично проводятся расчёты параметров фактического профиля для каждой точки измерения. Результаты расчёта параметров фактического профиля заносятся в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Параметры фактического профиля ствола скважины

Длина ствола, м	Смещение, м	Азимут (магнитный) смещения, град	Интенсивность искривления, град./10 м	Угол ориентации, град.
1500	253,21	13,71	0,0913	58,25
1600	254,57	19,44	0,0750	0
1700	257,98	25,33	0,1121	49,46
1800	263,66	31,30	0,0500	0
1900	271,74	37,22	0,1167	31,98
2000	282,57	43,03	0,0500	0
2100	296,23	48,61	0,0500	0
2200	312,89	53,78	н	н

Приведённые в таблице 6.3 геометрические параметры дают возможность определить места резкого искривления ствола скважины, которые являются интервалами вероятного образования желобов, осложнений при спуске обсадных колонн, а также проанализировать интервал бурения забойным двигателем-отклонителем в целях определения фактического угла закручивания бурильной колонны от реактивного момента забойного двигателя и фактической интенсивности искривления ствола.

7. Неопределённость положения ствола скважины

При инклинометрии ствола скважины ошибки измерения различного происхождения приводят к неопределённости фактического положения ствола скважины. Типы ошибок могут быть разделены на случайные и систематические.

Различие между результатом измерений (когда одним и тем же прибором проводят ряд измерений на фиксированной глубине) является примером случайной ошибки. В общем случае случайные ошибки устраняются при переходе от одной точки измерения к другой. Случайная составляющая погрешности измерений при прочих равных условиях значительно меньше влияет на размер области неопределённости положения точки измерения параметров ствола скважины. Влияние случайной ошибки на результаты расчётов траектории бурения снижается с увеличением числа измерений.

Систематические ошибки присутствуют при каждом измерении по мере перемещения прибора по стволу скважины. Систематические ошибки от одной точки измерения к другой накапливаются в одном направлении (положительном или отрицательном). Систематические ошибки являются основной причиной неопределённости положения расчётной траектории бурения в пространстве.

Систематические ошибки измерения возникают вследствие различных причин:

- ошибка в определении глубины расположения измерительного прибора;
- собственная ошибка прибора (характеристика датчиков);
- магнитные помехи (магнитная интерференция – наложение на магнитное поле Земли магнитных полей горной породы, элементов бурильной колонны и конструкции скважины);
- ошибка, связанная с перекосом прибора в скважине;
- ошибка, обусловленная деформацией и несоосным расположением измерительного прибора;
- субъективная ошибка;
- ошибка, связанная с движением измерительного прибора в стволе скважины в процессе измерения (измерительный прибор при измерении должен находиться в покое при отсутствии вибраций).

Ошибка вследствие влияния магнитных масс на датчик инклинометра или телесистемы состоит из следующих компонент:

- магнитное поле бурильной колонны;
- влияние магнитных горных пород;
- близость обсадной колонны;
- влияние магнитных масс соседних скважин;
- влияние дефектов диамагнитных элементов бурильной колонны и оборудования (местные магнитные включения или соединительные элементы, например стальные замковые соединения бурильных труб из алюминия).

Свести к минимуму влияние магнитной интерференции бурильной колонны позволяют диамагнитные УБТ, а также забойные двигатели из диамагнитного сплава. Минимальная длина диамагнитной трубы выбирается в зависимости от проектного азимута и географического расположения скважины (географической широты) в соответствии с разработанными специальными таблицами.

Субъективные ошибки (человеческий фактор) возникают, в основном, при использовании инклинометров с цифровой шкалой, фотоинклинометров, а также при интерпретации результатов измерений.

Ошибки, возникающие при расчёте положения ствола скважины, зависят от точности выбранного метода расчёта его координат.

Когда указанные ошибки учитываются, то результатом расчёта координат ствола является некоторая область в пространстве, в которой вероятно располагается ось ствола скважины. Проекция области вероятного положения точки оси ствола скважины на горизонтальную плоскость представляет собой

фигуру в виде овала. В большинстве случаев расчётное положение оси ствола, определённое на основании измерений, находится внутри этой области, называемой эллипсом неопределённости.

Эллипсы неопределённости были впервые предложены для описания неопределённости положения ствола скважины. Эллипсы проектировались в двухмерном изображении в горизонтальной плоскости, наносились на горизонтальную проекцию стволов скважины, чтобы определить взаимное положение областей неопределённости соседних скважин.

Известно несколько моделей неопределённости, которые учитывают ошибки инструментальных измерений. Модели отличаются методами, которые используются для учёта ошибок.

Простой конус – это простейшая модель неопределённости, которая используется в случаях, когда неизвестны параметры инструментальных ошибок. Простая конусная модель состоит из расширяющейся секции усечённого конуса с некоторым начальным радиусом на устье скважины. Данная модель приближённо учитывает ошибки измерений путём построения конусного объёма в пространстве, в котором, как считается, расположен ствол скважины (рисунок 7.1). Основание конуса увеличивается с длиной ствола скважины.

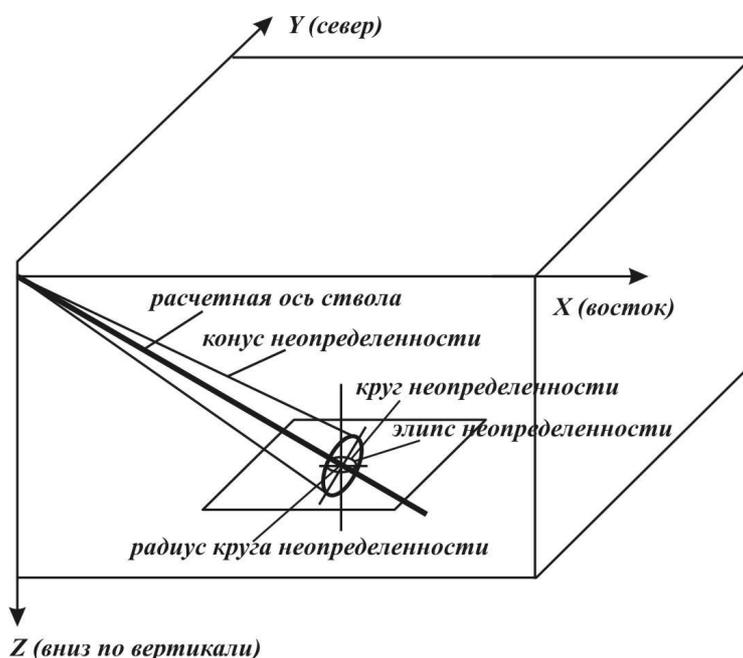


Рисунок 7.1 – Круг и эллипс неопределённости положения оси ствола скважины

Каждая конусная секция может иметь различную интенсивность расширения. Так как данная модель неопределённости является наиболее простой, она легко рассчитывается и используется исходя из имеющегося производственного опыта.

Модель простого конуса зависит от интенсивности расширения конуса и измеренной длины ствола скважины, без учёта влияния зенитного угла и азимута ствола скважины, а также влияния типа измерительного инструмента на величину интенсивности расширения конуса.

Точность определения пространственного положения оси скважины зависит от ряда факторов, среди которых определяющими являются тип используемого измерительного инструмента и его положение в скважине с учётом изменения зенитного угла и азимута. В мировой практике бурения приняты следующие значения погрешности измерения в зависимости от типа измерительного инструмента (таблица 7.1). Данные, приведённые в таблице 7.1, используются при расчёте неопределённости положения оси скважины в программном обеспечении.

Таблица 7.1 – Данные для расчёта размеров области неопределённости

Зенитный угол, град.	Тип измерительного устройства	Погрешность измерения зенитного угла, град.	Погрешность измерения азимута, град.
<5	Магнитные инклинометры	±0,25	±5,0
	Телесистемы с проводным каналом	±0,25	±5,0
	Телесистемы с гидравлическим каналом связи	±0,25	±5,0
	Гироскопические инклинометры	±0,25	±5,0
>5	Магнитные инклинометры	±0,20	±2,0
	Телесистемы с проводным каналом	±0,15	±1,50
	Телесистемы с гидравлическим каналом связи	±0,10	±1,25
	Гироскопические инклинометры	±0,10	±1,25

Положение любой точки оси скважины определяется областью неопределённости, радиус которой определяется по формуле:

$$R = \sqrt{(X - X_{и})^2 + (Y - Y_{и})^2 + (Z - Z_{и})^2}, \quad (7.1)$$

где X, Y, Z и $X_{и}, Y_{и}, Z_{и}$ – расчётные координаты и координаты точек оси скважины, вычисленные с учётом добавления систематической положительной ошибки соответственно, м (таблица 7.1). Кроме того, принимается во внимание

ошибка в определении длины ствола скважины, которая составляет от $\pm 1/500$ до $\pm 1/1000$ длины бурильной колонны. Таким образом, любая точка оси ствола находится внутри пространства, ограниченного эллипсоидом неопределённости.

Параметры неопределённости положения точек оси ствола скважины учитываются при расчёте расстояния между осями стволов скважин в кусте, определении положения забоя скважины относительно круга допуска и корректирования траектории бурения.

8. Допустимые проектные отклонения ствола скважины

В процессе проводки тангенциальных и искривлённых участков наклонной скважины в результате влияния геологических, технических и технологических факторов фактическая траектория бурения отклоняется от проектного профиля.

Допустимое проектное отклонение устанавливается в виде круга радиусом ($R_{\text{Д}}$), равным максимальному допустимому отклонению оси ствола от запланированной точки вскрытия или пересечения кровли продуктивного пласта. Допустимый радиус круга допуска для каждой скважины устанавливается геологической и добывающей службами нефтегазовой компании. Круг допуска с указанием координат центра наносится на горизонтальную и вертикальную проекции проектного профиля (рисунок 8.1).

Для горизонтального ствола допустимые вертикальные (h_1, h_2) и горизонтальные (a_1, a_2) отклонения устанавливаются по длине с заданием координат (X, Y, Z), а также значений зенитного угла (α_{BX}) и проектного азимута $\varphi_{\text{ДР}}$ в начальной точке горизонтального ствола (рисунок 8.2).

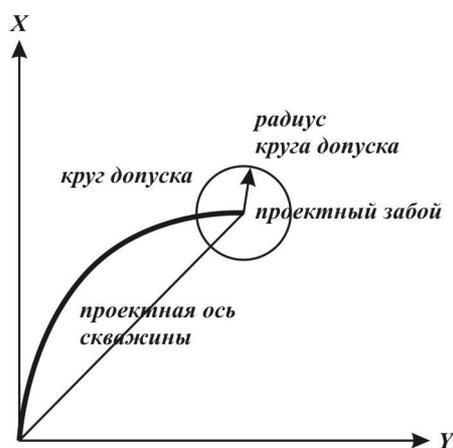


Рисунок 8.1 – Круг допуска точки вскрытия пласта стволом скважины

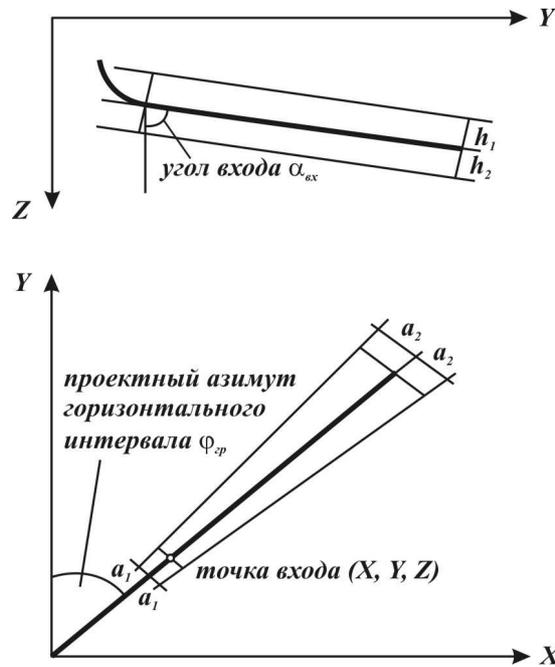


Рисунок 8.2 – Допустимые отклонения горизонтального ствола

На основании установленного круга допуска для каждой точки оси направленной части ствола определяется текущий радиус (R_T) круга допуска:

$$R_T = \frac{l_T}{l_{II}} \cdot R_{II}, \quad (8.1)$$

где l_T – текущая длина оси ствола, м;
 l_{II} – проектная длина оси ствола, м;
 R_{II} – проектный радиус круга допуска, м.

Для горизонтального ствола при ограничении области допустимых отклонений оси ствола усечённой круговой конической поверхностью текущий радиус (R_T) круга допуска определяется из выражения:

$$R_T^F = R_{II1}^F + \frac{l_T}{l_{II}} \cdot (R_{II2}^F - R_{II1}^F), \quad (8.2)$$

где R_T^F – текущий радиус круга допуска горизонтального участка, м;
 R_{II1}^F – проектный радиус круга допуска в начале горизонтального участка, м;
 R_{II2}^F – проектный радиус круга допуска в конце горизонтального участка, м;
 l_T – текущая длина горизонтального участка, м;
 l_{II} – проектная длина горизонтального участка, м.

Суммарное отклонение (r_ϕ) ствола скважины от проектного профиля в горизонтальной плоскости на глубине текущего забоя Z_ϕ определяется по формуле:

$$r_{\phi} = \sqrt{(Y_{IP} - Y_{\phi})^2 + (X_{IP} - X_{\phi})^2}, \quad (8.3)$$

где Y_{ϕ}, X_{ϕ} – текущие координаты фактического профиля ствола, м;
 Y_{IP}, X_{IP} – координаты проектного профиля ствола, соответствующие текущей координате Z_{ϕ} , м.

Для определения положения фактического забоя по отношению к центру текущего круга допуска необходимо определить параметр C_1 эллипса неопределённости положения ствола скважины в данной точке измерения.

$$C_1 = \frac{r_T^2 \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \Delta \varphi_n \cdot r_T^2 \cdot \cos^2 \Delta \alpha + r_T^2}}}{\cos \Delta \varphi_n}, \quad (8.4)$$

где $r_T = \sqrt{(X - X_{II})^2 + (Y - Y_{II})^2}$, м;

r_T – радиус круга неопределённости, м;

X, Y – расчётные координаты точек фактической траектории ствола скважины, м;

X_{II}, Y_{II} – расчётные координаты точек фактической траектории ствола скважины, вычисленные с учётом систематической, положительной ошибки измерительных приборов, м (таблица 7.1);

α – зенитный угол ствола скважины, град.;

$\Delta \alpha$ – разница между проектным и фактическим зенитными углами, град.;

$\Delta \varphi$ – разница между проектным и фактическим азимутами, град.

Если отклонение текущего забоя ствола скважины от проектного круга допуска $r_{\phi} \geq R_n + C_1$, то фактический текущий забой находится за пределами текущего круга допуска с радиусом R_{II} . В этом случае обязательно корректирование направления бурения ствола скважины.

Если $r_{\phi} \leq R_{II} - C_1$, то текущий забой находится в пределах текущего круга допуска.

При $R_{II} - C_1 < r_{\phi} < R_{II} + C_1$ фактический забой находится внутри или за пределами текущего круга допуска с равной вероятностью.

9. Контроль и прогнозирование траектории скважины при бурении

9.1 Методика расчёта курсовых зенитных и азимутальных углов

Контроль проводки ствола наклонной или горизонтальной скважины основан на решении следующих взаимосвязанных задач:

- расчёт координат ствола скважины в точках измерения;
- расчёт неопределённости положения ствола скважины;
- оценка степени отклонения фактической траектории от проектного профиля;
- построение прогнозной траектории скважины;
- выбор и расчёт интервала корректирования направления бурения.

Для оценки соответствия траектории бурения проектному профилю необходимо оценить положение забоя скважины по отношению к текущему или конечному кругу допуска (рисунок 9.1).

Исходными данными для решения поставленной задачи являются следующие параметры:

$X_A; Y_A; Z_A$ – координаты забоя ствола скважины, м;

$X_D; Y_D; Z_D$ – координаты центра круга допуска, м;

R_{PP} – радиус круга допуска, м;

φ_{PP} – проектный азимут, град.;

α_A – зенитный угол на забое, град.;

φ_A – азимут на забое, град.;

$\varphi_{A-Л}$ – азимут на левый край круга допуска, град.;

$\varphi_{A-Ц}$ – азимут на центр круга допуска, град.;

$\varphi_{A-П}$ – азимут на правый край круга допуска, град.;

$\alpha_{A-Б}$ – зенитный угол на ближний край круга допуска, град.;

$\alpha_{A-Ц}$ – зенитный угол на центр круга допуска, град.;

$\alpha_{A-Д}$ – зенитный угол на дальний край круга допуска, град.;

ΔS – расстояние между забоем скважины и центром круга допуска, м;

S_{A-D} – расстояние между горизонтальной проекцией забоя и центром круга допуска, м;

S_{A-G} – расстояние от горизонтальной проекции забоя до центра хорды круга допуска в азимуте забоя (при $\varphi_{A-Л} > \varphi_A > \varphi_{A-П}$), м;

S_{A-E} – расстояние от горизонтальной проекции забоя до ближайшего края круга допуска в азимуте забоя (при $\varphi_{A-L} > \varphi_A > \varphi_{A-П}$), м;

S_{A-F} – расстояние от горизонтальной проекции забоя до дальнего края круга допуска в азимуте забоя (при $\varphi_{A-L} > \varphi_A > \varphi_{A-П}$), м;

S_{A-H} – расстояние от горизонтальной проекции забоя до точки касания с кругом допуска, м.

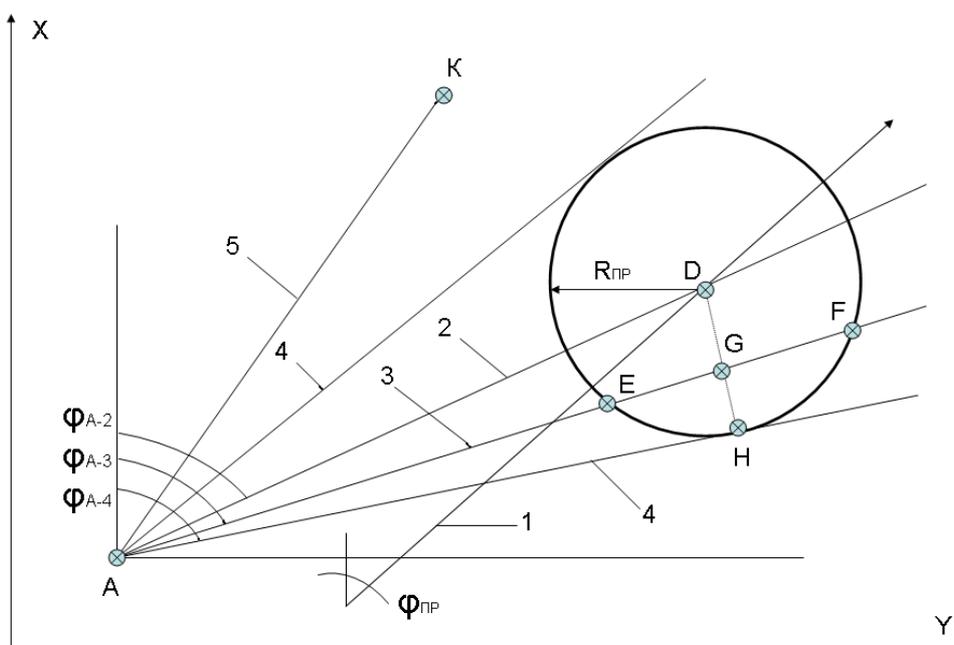


Рисунок 9.1 – Схема расчёта курсовых зенитных и азимутальных углов:
 1 – проектное направление бурения; 2 – направление на центр круга допуска;
 3 – направление бурения, пересекающее круг допуска по хорде;
 4 – направление бурения, касательное к кругу допуска;
 5 – направление бурения мимо круга допуска

9.1.1 Расстояние (ΔS) между забоем скважины и центром круга допуска:

$$\Delta S = \sqrt{(X_A - X_D)^2 + (Y_A - Y_D)^2 + (Z_A - Z_D)^2}. \quad (9.1)$$

9.1.2 Расстояние (S_{A-D}) между горизонтальной проекцией забоя A и центром D круга допуска по горизонтали:

$$S_{A-D} = \sqrt{(X_A - X_D)^2 + (Y_A - Y_D)^2}. \quad (9.2)$$

9.1.3 Азимут (φ_{A-D}) – на центр круга допуска:

$$\varphi_{A-D} = \varphi_A + \operatorname{arctg} \frac{-(X_D - X_A) \cdot \sin \varphi_A + (Y_D - Y_A) \cdot \cos \varphi_A}{(X_D - X_A) \cdot \cos \varphi_A + (Y_D - Y_A) \cdot \sin \varphi_A}. \quad (9.3)$$

9.1.4 Зенитный угол ($\alpha_{A-Ц}$) на центр круга допуска:

$$\alpha_{A-Ц} = \arctg \frac{S_{A-D}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.4)$$

Предельные значения азимута на левый и правый край круга допуска определяются по следующим формулам.

9.1.5 Азимут ($\varphi_{A-Л}$) на левый край круга допуска:

$$\varphi_{A-Л} = \varphi_{A-D} - \arcsin \frac{R_{ПП}}{S_{A-D}}. \quad (9.5)$$

9.1.6 Азимут ($\varphi_{A-П}$) на правый край круга допуска:

$$\varphi_{A-П} = \varphi_{A-D} + \arcsin \frac{R_{ПП}}{S_{A-D}}. \quad (9.6)$$

9.1.7 Зенитный угол ($\alpha_{A-Б}$) на ближайший край круга допуска:

$$\alpha_{A-Б} = \arctg \frac{S_{A-D} - R_{ПП}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.7)$$

9.1.8 Зенитный угол ($\alpha_{A-Д}$) на дальний край круга допуска:

$$\alpha_{A-Д} = \arctg \frac{S_{A-D} + R_{ПП}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.8)$$

Если апсидальная плоскость фактического ствола не совпадает с проектной апсидальной плоскостью и пересекает круг допуска по хорде ($\varphi_{A-П} \setminus \varphi_A \setminus \varphi_{A-Л}$), то разница в азимутах на центр круга и азимутом на забое:

$$\varphi_{A-Ц} - \varphi_A = \Delta\varphi_1.$$

9.1.9 Расстояние (S_{A-G}) от горизонтальной проекции забоя до центра хорды круга допуска в азимуте забоя:

$$S_{A-G} = S_{A-D} \cdot \cos(\varphi_{A-D} - \varphi_A). \quad (9.9)$$

9.1.10 Расстояние (S_{A-E}) от горизонтальной проекции забоя до ближайшего края круга допуска в азимуте забоя:

$$S_{A-E} = S_{A-G} - \sqrt{R_{ПП}^2 - S_{A-D}^2 \cdot \sin^2(\varphi_A - \varphi_{A-D})}. \quad (9.10)$$

9.1.11 Расстояние (S_{A-F}) от горизонтальной проекции забоя до дальнего края круга допуска:

$$S_{A-F} = S_{A-G} + \sqrt{R_{ПП}^2 - S_{A-D}^2 \cdot \sin^2(\varphi_A - \varphi_{A-D})}. \quad (9.11)$$

9.1.12 Расстояние (S_{D-G}) от центра круга допуска до центра хорды:

$$S_{D-G} = \sqrt{R_{\text{ПП}}^2 - \left(\frac{S_{A-F} - S_{A-E}}{2} \right)^2}. \quad (9.12)$$

9.1.13 Зенитный угол (α_{A-G}) на центр хорды круга допуска по азимуту забоя:

$$\alpha_{A-G} = \text{arctg} \frac{S_{A-G}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.13)$$

9.1.14 Зенитный угол (α_{A-E}) на ближний край круга допуска по азимуту забоя:

$$\alpha_{A-E} = \text{arctg} \frac{S_{A-E}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.14)$$

9.1.15 Зенитный угол (α_{A-F}) на дальний край круга допуска по азимуту забоя:

$$\alpha_{A-F} = \text{arctg} \frac{S_{A-F}}{Z_D - Z_A}. \quad (9.15)$$

Приведённые выше формулы позволяют определить положение забоя наклонно направленной скважины по отношению к кругу допуска и после построения прогнозной траектории бурения до глубины круга допуска принимать решение о необходимости корректирования траектории бурения.

Прогнозируемые координаты ($X_{\text{П}}$; $Y_{\text{П}}$) на глубине (Z_D) положения круга допуска.

9.1.16 При бурении с сохранением забойных значений зенитного угла (α_A) и азимута (φ_A) (по прямой линии):

$$\begin{aligned} X_{\text{П}} &= X_A + (Z_D - Z_A) \cdot \text{tg} \alpha_A \cdot \cos \varphi_A; \\ Y_{\text{П}} &= Y_A + (Z_D - Z_A) \cdot \text{tg} \alpha_A \cdot \sin \varphi_A. \end{aligned} \quad (9.16)$$

9.1.17 При бурении с увеличением зенитного угла с постоянной интенсивностью (по дуге окружности с радиусом $R_{A-\text{П}}$) и в азимуте забоя:

$$\begin{aligned} X_{\text{П}} &= X_A + R_{A-\text{П}} \cdot (\cos \alpha_A - \cos \alpha_{\text{П}}) \cdot \cos \varphi_A; \\ Y_{\text{П}} &= Y_A + R_{A-\text{П}} \cdot (\cos \alpha_A - \cos \alpha_{\text{П}}) \cdot \sin \varphi_A, \end{aligned} \quad (9.17)$$

где $\alpha_{\text{П}} = \arcsin \frac{(Z_D - Z_A) + R_{A-\text{П}} \cdot \sin \alpha_A}{R_{A-\text{П}}}$.

При этом должно выполняться условие: $R_{A-\text{П}} \geq \frac{Z_D - Z_A}{1 - \sin \alpha_A}$.

9.1.18 При бурении с уменьшением зенитного угла с постоянной интенсивностью (по дуге окружности с радиусом $R_{A-П}$) и в азимуте забоя:

$$\begin{aligned} X_{П} &= X_A + R_{A-П} \cdot (\cos \alpha_{П} - \cos \alpha_A) \cdot \cos \varphi_A; \\ Y_{П} &= Y_A + R_{A-П} \cdot (\cos \alpha_{П} - \cos \alpha_A) \cdot \sin \varphi_A, \end{aligned} \quad (9.18)$$

где $\alpha_{П} = \arcsin \frac{(Z_D - Z_A) + R_{A-П} \cdot \sin \alpha_A}{R_{A-П}}$, при условии $R_{A-П} \geq \frac{Z_D - Z_A}{\sin \alpha_A}$.

9.2 Пример расчёта курсовых зенитных и азимутальных углов

Исходные данные для расчёта приведены в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Исходные данные для расчёта курсовых значений зенитного угла и азимута

Проектный азимут, град.	120
Параметры на забое скважины	
Глубина забоя по стволу, м	2200
Координаты забоя:	
Y_A , м	252,4
X_A , м	184,9
Z_A , м	2143,0
Зенитный угол (α_A), град.	19
Азимут (φ_A), град.	110
Радиус круга допуска ($R_{ДП}$), м	50
Координаты центра круга допуска	
X_D , м	50
Y_D , м	700
Z_D , м	3200

Координаты забоя скважины и центра круга допуска задаются в системе координат, центр которых совпадает с устьем скважины.

В таблице 9.1 координаты забоя скважины и центра круга допуска заданы в системе «Север-Восток», при которой ось X направлена на магнитный Север, а ось Y – на Восток.

На основании данных таблицы 9.1 и с использованием формул (9.1-9.15) рассчитываются предельные зенитные и азимутальные углы, а также расстояние до центра круга допуска.

9.1.1 Расстояние (ΔS) между забоем скважины и центром круга допуска:

$$\Delta S = \sqrt{(184,9 - 50)^2 + (252,4 - 700)^2 + (2143 - 3200)^2} = 1155,77 \text{ м.}$$

9.1.2 Расстояние (S_{A-D}) между горизонтальной проекцией забоя A и центром D круга допуска по горизонтали:

$$S_{A-D} = \sqrt{(184,9 - 50)^2 + (252,4 - 700)^2} = 467,49 \text{ м.}$$

9.1.3 Азимут (φ_{A-D}) – на центр круга допуска:

$$\varphi_{A-D} = 110 + \operatorname{arctg} \frac{-(50 - 184,9) \cdot \sin 110 + (700 - 252,4) \cdot \cos 110}{(50 - 184,9) \cdot \cos 110 + (700 - 252,4) \cdot \sin 110} = 106,77 \text{ град.}$$

9.1.4 Зенитный угол ($\alpha_{A-Ц}$) на центр круга допуска:

$$\alpha_{A-Ц} = \operatorname{arctg} \frac{467,49}{3200 - 2143} = 23,86 \text{ град.}$$

Предельные значения азимута на левый и правый край круга допуска определяются по следующим формулам.

9.1.5 Азимут ($\varphi_{A-Л}$) на левый край круга допуска:

$$\varphi_{A-Л} = 106,77 - \arcsin \frac{50}{467,49} = 100,63 \text{ град.}$$

9.1.6 Азимут ($\varphi_{A-П}$) на правый край круга допуска:

$$\varphi_{A-П} = 106,77 + \arcsin \frac{50}{467,49} = 112,91 \text{ градус.}$$

9.1.7 Зенитный угол ($\alpha_{A-Б}$) на ближайший край круга допуска по азимуту забоя:

$$\alpha_{A-Б} = \operatorname{arctg} \frac{467,49 - 50}{3200 - 2143} = 21,87 \text{ град.}$$

9.1.8 Зенитный угол ($\alpha_{A-Д}$) на дальний край круга допуска по азимуту забоя:

$$\alpha_{A-Д} = \operatorname{arctg} \frac{467,49 + 50}{3200 - 2143} = 25,72 \text{ град.}$$

Результаты расчётов (позиции 9.1-9.8) говорят о том, что при азимуте на забое 110° ствол направлен в круг допуска, так как предельные значения азимута равны $100,63-112,91^\circ$ (позиции 9.1.5-9.1.6). Однако при сохранении забойных параметров при дальнейшем бурении, другими словами, при бурении по прямой в азимуте 110° и при зенитного угле 19° , скважина не попадёт в круг допуска, так как минимально необходимое для этого значение зенитного угла равно $21,87^\circ$ (позиция 9.1.7).

С целью расчёта траектории дальнейшего углубления скважины необходимо определить расстояние по горизонтали до цели бурения – круга допуска.

9.1.9 Расстояние (S_{A-G}) от горизонтальной проекции забоя до центра хорды круга допуска в азимуте забоя:

$$S_{A-G} = 467,49 \cdot \cos(23,86 - 19) = 466,74 \text{ м.}$$

9.1.10 Расстояние (S_{A-E}) от горизонтальной проекции забоя до ближайшего края круга допуска в азимуте забоя:

$$S_{A-E} = 466,74 - \sqrt{50^2 - 467,49^2 \cdot \sin^2(110 - 106,77)} = 424,24 \text{ м.}$$

9.1.11 Расстояние (S_{A-F}) от горизонтальной проекции забоя до дальнего края круга допуска:

$$S_{A-F} = 466,74 + \sqrt{50^2 - 467,49^2 \cdot \sin^2(110 - 106,77)} = 509,25 \text{ м.}$$

9.1.12 Расстояние (S_{D-G}) от центра круга допуска до центра хорды:

$$S_{D-G} = \sqrt{50^2 - \left(\frac{509,25 - 424,24}{2}\right)^2} = 26 \text{ м.}$$

Зависимости (9.16) и (9.17) позволяют определить взаимное положение ствола скважины и центра круга допуска на проектной глубине при бурении по заданной траектории.

Прогнозируемые координаты (X_{II} ; Y_{II}) ствола скважины на глубине ($Z_D = 3200$ м).

9.1.16 При бурении с сохранением забойных значений зенитного угла (α_A) и азимута (φ_A) (по прямой линии):

$$X_{II} = 184,9 + (3200 - 2143) \cdot \operatorname{tg} 19 \cdot \cos 110 = 60,4 \text{ м;}$$

$$Y_{II} = 252,4 + (3200 - 2143) \cdot \operatorname{tg} 19 \cdot \sin 110 = 594,38 \text{ м.}$$

Расстояние между скважиной и центром круга допуска при бурении по прямой рассчитывается по формуле (9.2):

$$S_{II-D} = \sqrt{(60,4 - 50)^2 + (594,38 - 700)^2} = 106,13 \text{ м.}$$

Таким образом, при бурении с сохранением забойных значений зенитного угла и азимута ствол скважины на проектной глубине будет находиться на расстоянии 106,13 м от центра круга допуска, что при радиусе последнего 50 м недопустимо.

Так как зенитный угол ствола на забое меньше минимально необходимого значения $21,87^\circ$ (позиция 9.1.7), то дальнейшее бурение необходимо осуществлять по профилю с увеличением зенитного угла.

9.1.17 При бурении с увеличением зенитного угла с постоянной интенсивностью (по дуге окружности с радиусом, например, $R_{A-II} = 7000$ м) и в азимуте забоя:

$$X_{II} = 184,9 + 7000 \cdot (\cos 19 - \cos 28,46) \cdot \cos 110 = 26,18 \text{ м};$$

$$Y_{II} = 252,4 + 7000 \cdot (\cos 19 - \cos 28,46) \cdot \sin 110 = 688,51 \text{ м},$$

где $\alpha_{II} = \arcsin \frac{(3200 - 2143) + 7000 \cdot \sin 19}{7000} = 28,46 \text{ градуса}.$

Расстояние между скважиной и центром круга допуска при бурении по дуге окружности радиусом 7000 м рассчитывается по формуле (9.2):

$$S_{II-D} = \sqrt{(26,18 - 50)^2 + (688,51 - 700)^2} = 26 \text{ м}.$$

Таким образом, при углублении ствола скважины с увеличением зенитного угла по радиусу 7000 м ствол скважины на проектной глубине 3200 м будет находиться в круге допуска на расстоянии 26 м от его центра, что удовлетворяет условию по точности проводки скважины.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- при дальнейшем бурении с сохранением забойных значений зенитного угла и азимута скважина на проектной глубине 3200 м не попадает в круг допуска;

- необходима коррекция профиля ствола скважины на завершающем интервале бурения;

- так как зенитный угол ствола на забое меньше минимально необходимого значения $21,87^\circ$ (позиция 9.1.7), то дальнейшее бурение необходимо осуществлять по профилю с увеличением зенитного угла.

Таким образом, полученные результаты расчёта позволят принять своевременное решение о корректировании геометрии завершающего участка профиля скважины и выборе соответствующей КНБК.

10. Корректирование траектории при бурении

При отклонении ствола скважины от проектного профиля возникает необходимость корректирования траектории бурения с целью выведения ствола скважины в точку с заданными координатами.

При бурении направленных скважин применяются винтовые забойные двигатели-отклонители (ВЗДО), которые искривляют ствол скважины по дуге, которая близка к дуге окружности. Поэтому профиль корректирования может быть представлен в виде дуги окружности или в виде дуги окружности и завершающего тангенциального интервала.

Если выполняется условие $\varphi_{AI} < \varphi_2 < \varphi_{AII}$, другими словами, горизонтальная проекция прогнозной траектории бурения пересекает проектный круг допуска, то профиль корректирования может быть плоским. В остальных случаях профиль участка корректирования траектории бурения является пространственным.

Корректирование по дуге окружности (рисунок 10.1) применяется в том случае, когда при бурении с сохранением текущего азимута забоя горизонтальная проекция траектории бурения направлена в круг допуска, но при прогнозируемой величине интенсивности изменения зенитного угла ствол скважины на проектной глубине не попадает в круг допуска.

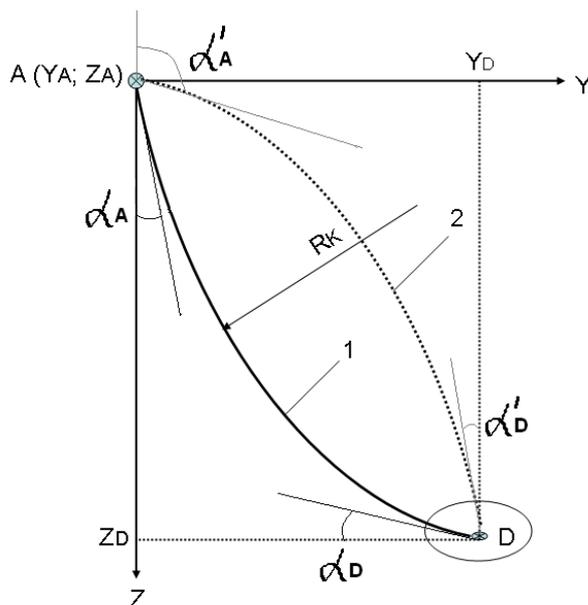


Рисунок 10.1 – Схема расчёта интервала корректирования по дуге окружности:

1 – с увеличением зенитного угла; 2 – с уменьшением зенитного угла;

$\alpha_A (\alpha'_A); \alpha_D (\alpha'_D)$ – зенитный угол в точке A и D соответственно;

R_K – радиус кривизны интервала корректирования

Проектный радиус (R_K) искривления ствола определяется по формуле:

$$R_K = \frac{M^2 + T^2}{2 \cdot T}; \quad (10.1)$$

$$T = [\pm A_K \mp (Z_D - Z_A) \cdot \operatorname{tg} \alpha_A] \cdot \cos \alpha_A; \quad (10.2)$$

$$M = \frac{Z_D - Z_A}{\cos \alpha_A} \pm \left[\pm A_K \mp (Z_D - Z_A) \cdot \operatorname{tg} \alpha_A \right] \cdot \sin \alpha_A, \quad (10.3)$$

где A_K – необходимое смещение ствола по горизонтали за интервал корректирования с целью достижения круга допуска, м.

Зенитный угол (α_D) на проектной глубине Z_D :

$$\alpha_D = \arcsin \frac{\pm (Z_D - Z_A) + R_K \cdot \sin \alpha_A}{R_K}. \quad (10.4)$$

В формулах (9.2, 9.3, 9.4) верхний знак соответствует профилю с участком увеличения зенитного угла, а нижний знак – профилю с участком уменьшения зенитного угла (рисунок 10.1).

Длина интервала бурения до проектной глубины по дуге окружности с радиусом R_K определяется по формуле:

$$S_{A-D} = \frac{\pi \cdot |\alpha_D - \alpha_A| \cdot R_K}{180}. \quad (10.5)$$

Когда траектория бурения по дуге окружности до круга допуска не обеспечивается имеющимися техническими средствами или на величину радиуса искривления ствола накладываются технологические ограничения, то применяется двухинтервальный плоский профиль интервала корректирования, состоящий из дуги окружности и тангенциального интервала (рисунок 10.2).

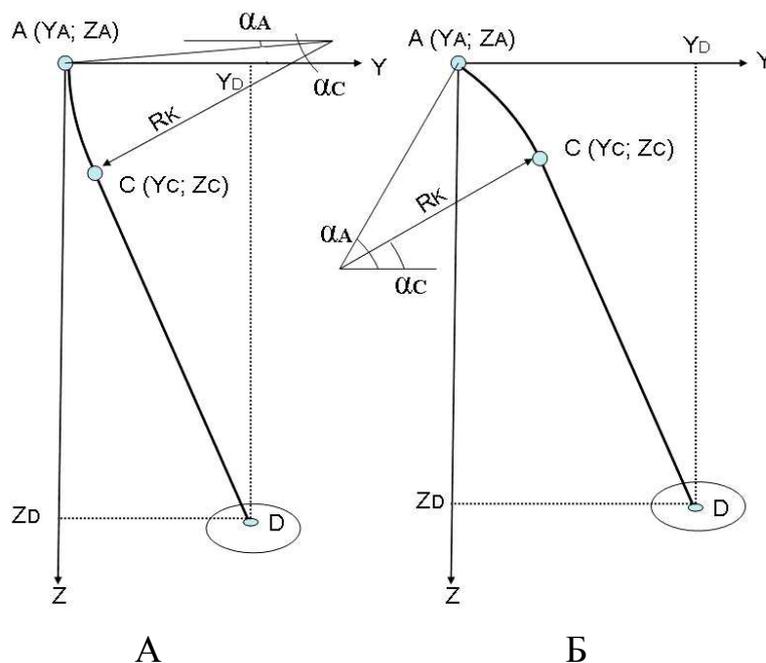


Рисунок 10.2 – Расчётная схема профиля с участками увеличения (А) и уменьшения (Б) зенитного угла

Зенитный угол (α_D) тангенциального интервала рассчитывается по формуле:

$$\alpha_D = \alpha_A + \arccos \frac{R_K \cdot (R_K - T) + M \cdot \sqrt{M^2 + T^2 - 2 \cdot T \cdot R_K}}{(R_K - T)^2 + M^2}. \quad (10.6)$$

Длина интервала бурения до точки C по дуге окружности с заданным радиусом (R_K) определяется по формуле:

$$S_{A-C} = \frac{\pi \cdot |\alpha_D - \alpha_A| \cdot R_K}{180}. \quad (10.7)$$

Длина (L_{C-D}) тангенциального интервала до точки D :

$$L_{C-D} = \frac{(Z_D - Z_A) \mp R_K \cdot (\sin \alpha_D - \sin \alpha_A)}{\cos \alpha_D}. \quad (10.8)$$

В формуле (10.8) верхний знак соответствует профилю с участком увеличения зенитного угла, а нижний знак – профилю с участком уменьшения зенитного угла (рисунок 10.2).

Для изменения азимута и выведения ствола скважины в точку с заданными координатами при бурении по дуге окружности применяется двухинтервальный пространственный профиль.

С целью усвоения приведённого материала рассмотрим конкретный пример корректирования траектории бурения.

Когда траектория бурения по дуге окружности радиусом 7 000 м не обеспечивается имеющимися техническими средствами или на величину радиуса искривления ствола накладываются технологические ограничения, то применяется двухинтервальный плоский профиль интервала корректирования, состоящий из дуги окружности с заданным радиусом и тангенциального интервала (рисунок 10.2 А).

За проектную точку бурения внутри круга допуска принимаем центр хорды круга допуска по азимуту забоя, равную 466,74 м (см. позиция 10.1.9).

Проектный радиус кривизны дуги окружности профиля – 382 м.

Зенитный угол (α_D) тангенциального интервала рассчитывается по формулам (10.2; 10.3; 10.6):

$$T = [466,74 - (3200 - 2143) \cdot \operatorname{tg} 19] \cdot \cos 19 = 97,2 \text{ м};$$

$$M = \frac{3200 - 2143}{\cos 19} + [466,74 - (3200 - 2143) \cdot \operatorname{tg} 19] \cdot \sin 19 = 1151,4 \text{ м};$$

$$\alpha_D = 19 + \arccos \frac{382 \cdot (382 - 97,2) + 1151,4 \cdot \sqrt{1151,4^2 + 97,2^2 - 2 \cdot 97,2 \cdot 382}}{(382 - 97,2)^2 + 1151,4^2} = 23,89 \text{ град.}$$

Длина интервала бурения до точки *C* по дуге окружности с заданным радиусом (R_K) определяется по формуле:

$$S_{A-C} = \frac{\pi \cdot |23,89 - 19| \cdot 382}{180} = 32,63 \text{ м.}$$

Длина (L_{C-D}) тангенциального интервала до точки *D*:

$$L_{C-D} = \frac{(3200 - 2143) - 382 \cdot (\sin 23,89 - \sin 19)}{\cos 23,89} = 1122,87 \text{ м.}$$

Результаты расчёта заносятся в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Параметры профиля до проектной глубины при бурении по двухинтервальному профилю

Название участка	Глубина по вертикали	Длина ствола	Длина интервала	Смещение от забоя	Зенитный угол	Интенсивность искривления
	м	м	м	град.	град.	град./100 м
Дуга	2 173,36	2 232,63	3 2,63	11,93	23,89	1,5
Наклонно-прямой	3 200,00	3 355,50	1122,87	466,74	23,89	0,0

Таким образом, для выведения ствола скважины в круг допуска необходимо осуществлять дальнейшее бурение в интервале 2200-2233 м с интенсивностью увеличения зенитного угла 1,5 град./100 м, а дальнейшее бурение – по прямой с сохранением зенитного угла 23,89° и азимута 110°.

Библиографический список

1. Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин / А. С. Повалихин, А. Г. Калинин, С. Н. Бастриков, К. М. Солодкий ; под общ. ред. доктора технических наук, профессора А. Г. Калинина. – М. : Изд. Центр-ЛитНефтеГаз, 2011. – 647 с.
2. Профили направленных скважин и компоновки низа бурильных колонн / А. Г. Калинин, Б. А. Никитин, К. М. Солодкий, А. С. Повалихин. – М. : Недра, 1995. – 305 с.
3. Колмогоров, В. Г. Основы геодезии и топографии : учеб. пособие / В. Г. Колмогоров. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 2004. – 151 с.

Оглавление

1. Основные положения.....	3
2. Система географических координат	3
3. Основные положения картографии	4
4. Система координат в бурении.....	7
5. Принципы измерений траекторных параметров ствола скважины	9
6. Методы расчёта координат ствола скважины	10
6.1. Основные положения	10
6.2 Метод среднего угла	12
6.3. Метод минимума кривизны и метод кольцевых дуг	12
6.4 Пример расчёта координат и траекторных параметров фактического профиля скважины.....	14
7. Неопределённость положения ствола скважины.....	17
8. Допустимые проектные отклонения ствола скважины.....	21
9. Контроль и прогнозирование траектории скважины при бурении.....	24
9.1. Методика расчёта курсовых зенитных и азимутальных углов	24
9.2 Пример расчёта курсовых зенитных и азимутальных углов	28
10. Корректирование траектории при бурении	31
Библиографический список.....	36