

5.8. ПРОЕКТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТА БАГАТОВИБІЙНИХ СВЕРДЛОВИН

5.8.1. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СВЕРДЛОВИНИ

Траєкторії горизонтальних свердловин проектують в апсидальній площині. Їх профіль складається з направляючої і горизонтальної частин.

Направляюча частина профілю горизонтальної свердловини може мати вертикальну ділянку, ділянку початкового викривлення, тангенціальну ділянку і ділянки збільшення зенітного кута або складатися з вертикальної ділянки і ділянки збільшення зенітного кута.

Горизонтальна частина профілю може бути увігнутою або випуклою, а також прямолінійною або хвилеподібною. Горизонтальна частина залежно від кута падіння продуктивного пласта може бути розташована під будь-яким заданим кутом до вертикалі, в тому числі і під кутом 90° .

Направляюча і горизонтальна частини профілю горизонтальної свердловини можуть розраховуватися окремо. Однак вони мають бути спряжені одна з одною.

Призначення направляючої частини профілю горизонтальної свердловини полягає у виведенні стовбура під визначеним кутом в точку продуктивного пласта із заданими координатами.

При проектуванні горизонтальних свердловин використовують тільки J-подібний тип профілю.

Свердловини з горизонтальною частиною протяжністю понад 500 м для зниження сил опору при переміщенні бурильного інструменту у свердловині та створення достатнього навантаження на долото проектується тільки з великим радіусом кривизни. При цьому використовують профілі 1, 2 і 5 (рис. 5.128).

Пройходження окремих ділянок профілю 2 або 5 горизонтальних свердловин можна здійснювати неорієнтовано, тобто з використанням КНБК, що істотно спрощує технологію буріння таких свердловин і скорочує час на проведення інклінометричних робіт. Однак КНБК можуть використовуватися тільки при бурінні гірських порід, в яких забезпечується надійна робота КНБК, а саме у разі стійкості порід на проектній траєкторії. Це слід враховувати при проектуванні горизонтальних свердловин з великим радіусом кривизни.

Точність розкриття продуктивного пласта при бурінні горизонтальних свердловин з середнім радіусом кривизни істотно підвищується у порівнянні з бурінням із великим радіусом кривизни. Тому підвищується також точність буріння горизонтальної ділянки в самому пласті. Довжина горизонтальної ділянки для профілю із середнім радіусом кривизни становить 800—1000 м.

Для проектування профілю з середнім радіусом кривизни використовують переважно профілі 1, 2, 3, рідше 4 і 5 (рис. 5.128).

Тангенціальну ділянку включають у тих випадках, коли потрібно забезпечити кінцеве відхилення направляючої частини профілю від вертикалі на проектній глибині, яка перевищує при цьому радіус кривизни ділянки збільшення зенітного кута, а також для проектування горизонтальних свердловин на родовищах, де не відпрацьована технологія орієнтованого буріння і тому існує велика ймовірність відхилення фактичного профілю від проектного. В останньому випадку свердловину можна пробурити, не змінюючи конструкції відхилювача, при цьому збільшуючи або зменшуючи довжину тангенціальної ділянки профілю.

При проектуванні свердловини із середнім радіусом кривизни проектну інтенсивність збільшення зенітного кута приймають на 10—20% меншою від максимальної інтенсивності

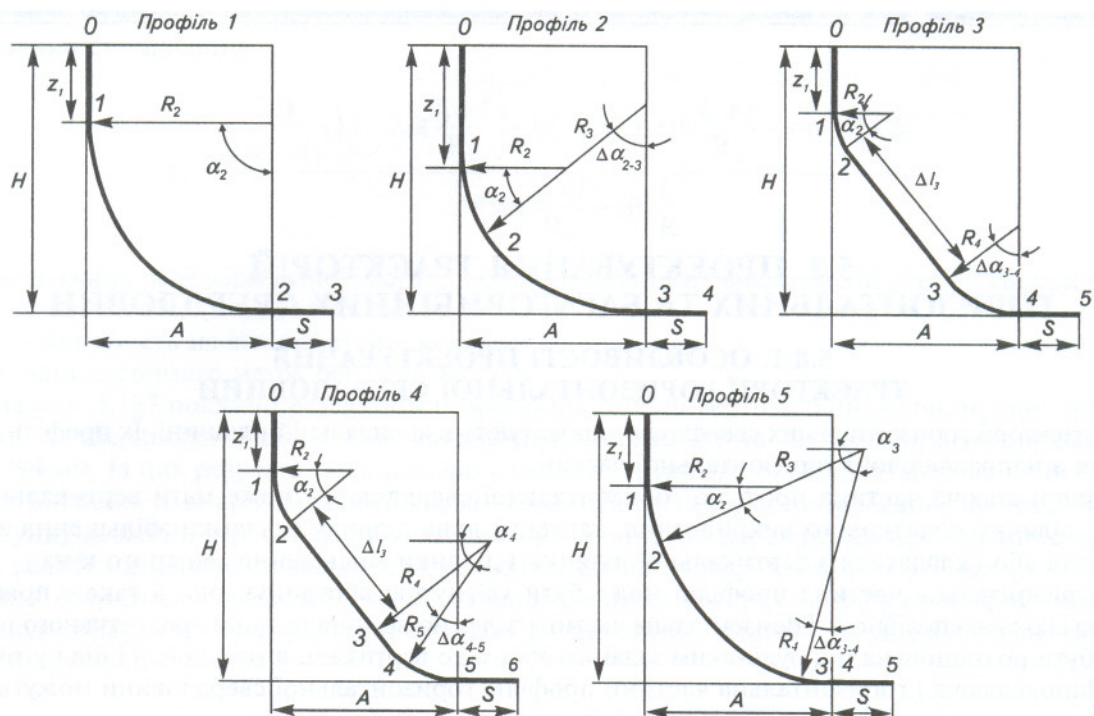


Рис. 5.128. Профілі горизонтальних свердловин

збільшення зенітного кута, що забезпечується відхилювачем, який є в розпорядженні бурового підприємства.

Профілі з малими і ультрамалими радіусами кривизни використовують для проектування профілю додаткового стовбура свердловини, буріння якого проводиться із вирізаної ділянки обсадної колони, а також для розкриття горизонтальним стовбуром малопотужних продуктивних пластів. Такі свердловини проектують переважно за профілем 1.

Коли радіуси кривизни інтервалів забурювання і виведення стовбура свердловини на проектний напрямок за рахунок особливостей технології буріння цих інтервалів істотно відрізняються один від одного, використовують профілі 2.

При бурінні з малим радіусом кривизни протяжність горизонтальної ділянки менша, ніж при бурінні з середнім радіусом кривизни.

Спорудження горизонтальних свердловин з коротким, а тим більше з ультракоротким радіусом неможливе без комплексу спеціального бурильного інструменту, а також вимірювальної техніки.

Однак при бурінні горизонтальних свердловин з малим і ультрамалім радіусом кривизни забезпечується найбільша у порівнянні з іншими типами профілю точність розкриття продуктивного пласта горизонтальним стовбуром, що робить його значно перспективнішим для розробки малопотужних багатопластових покладів нафти або газу.

В тих випадках, коли покрівля продуктивного пласта представлена нестійкими гірськими породами, використовують комбінований профіль горизонтальної свердловини, в якого верхні інтервали проектують з великим радіусом кривизни, а нижні — з середнім або малим.

Вибір профілю горизонтальної свердловини здійснюють залежно від її призначення, умов продуктивного пласта та схеми завершення свердловини.

Умови продуктивного пласта є визначальними при виборі профілю та його параметрів.

При цьому враховують такі основні фактори:

товщина продуктивного пласта;

положення газонафтового контакту;
положення водонафтового контакту;
наявність тріщин та їх орієнтація;
наявність та орієнтація непроникних перешкод;
відносна проникність.

На базі даної інформації обґрунтовують положення горизонтальної частини свердловини та допуски на її проходження у продуктивному пласті, необхідність у пілотному стовбурі. У разі відсутності геологічних реперів у заданій точці входження в продуктивний пласт може виникнути потреба у проходженні пілотного стовбура. Важливо також оцінити стійкість стінок свердловини, що є істотним при виборі технології буріння та кріплення свердловини.

Залежно від призначення свердловини і будови покладу потрібно також враховувати ряд інших факторів.

Схема завершення свердловини має відповідати області використання та бути сумісною з умовами покладу. Треба враховувати вимоги капітальних ремонтів при експлуатації свердловини, необхідність ізоляції окремих інтервалів для інтенсифікації видобутку.

Вибір схеми завершення свердловини визначає діаметр свердловини та інтенсивність набору кривизни. На її основі обґрунтовується конструкція свердловини.

Параметри профілю горизонтальної свердловини обґрунтовують на основі даних про характеристики покладу, а також даних про точність інклінометрії та можливості керування траєкторією свердловини.

Точність проходження свердловини значно підвищується при наявності *геологічних реперів*. Їх використовують для визначення глибини залягання заданого об'єкта. При відсутності таких реперів розглядається питання буріння пілотного стовбура.

Розташування точки входження в заданий об'єкт на горизонтальній ділянці відносно гирла свердловини визначає радіус викривлення профілю.

Зі зменшенням відстані між точкою входження в пласт та гирлом свердловини великі радіуси викривлення стають непридатними через неможливість входження в пласт у потрібному місці. В таких випадках використовують профілі з малими радіусами викривлення.

Профілі з середнім і великим радіусами викривлення можуть використовуватись у ситуаціях, коли розташування точки входження у пласт на горизонтальній ділянці не є строго визначеним, а також при достатньо великому проектному зміщенні точки входження у пласт від гирла свердловини або довільному виборі координат точки входження у пласт та гирла свердловини.

Довжина вертикальної ділянки має бути максимально можливою з урахуванням вимог до інтенсивності набору кривизни, заданого входження в пласт та допусків на відхилення фактичних параметрів траєкторії від проектних.

Верхня межа *інтенсивності набору кривизни* визначається вимогами завершення свердловин, досвідом буріння горизонтальних свердловин, навантаженням при переміщенні бурильної і обсадної колон у свердловині, вантажопідйомністю бурової установки. Нижня межа інтенсивності набору кривизни визначається дугою на ділянці від точки відхилення свердловини від вертикалі до точки входження у продуктивний пласт.

Розрахунок направляючої частини профілю зводять до визначення невідомих параметрів ділянок та виконують із використанням системи рівнянь виду (5.91).

Нижче наведені розрахункові формули для профілів, показаних на рис. 5.128.

Профіль 1. Вихідні дані: H , A , α_2 . Визначенню підлягають довжина вертикальної ділянки z_1 та радіус R_2 ділянки набору кривизни:

$$z_1 = H - \frac{A \sin \alpha_2}{1 - \cos \alpha_2}; \quad (5.118)$$

$$R_2 = \frac{A}{1 - \cos \alpha_2}. \quad (5.119)$$

Профіль 2. Вихідні дані $H, A, \alpha_2, \alpha_3 = \alpha_2 + \Delta\alpha_{2-3}, R_2$. Невідомі геометричні параметри профілю визначають за формулами

$$R_3 = \frac{A - R_2(1 - \cos\alpha_2)}{\cos\alpha_2 - \cos\alpha_3}; \quad (5.120)$$

$$z_1 = H - R_2 \sin\alpha_2 - R_3(\sin\alpha_3 - \sin\alpha_2). \quad (5.121)$$

Профіль 3. Вихідні дані $H, A, \alpha_2, \alpha_4 = \alpha_2 + \Delta\alpha_{3-4}, R_2, R_4$. Довжини тангенціальної Δl_3 та вертикальної z_1 ділянок визначають за такими формулами:

$$\Delta l_3 = [A - R_2(1 - \cos\alpha_2) - R_4(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_4)] / \sin\alpha_2; \quad (5.122)$$

$$z_1 = H - R_2 \sin\alpha_2 - R_4(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_4) - \Delta l_3 \sin\alpha_2. \quad (5.123)$$

Профіль 4. Вихідні дані $H, A, \alpha_2, \alpha_4, R_2, R_4, R_5, \alpha_5 = \alpha_4 + \Delta\alpha_{4-5}$. Невідомі геометричні параметри профілю визначають за формулами

$$\Delta l_3 = [A - R_2(1 - \cos\alpha_2) - R_4(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_4) - R_5(\cos\alpha_4 - \cos\alpha_5)] / \sin\alpha_2; \quad (5.124)$$

$$z_1 = H - R_2 \sin\alpha_2 - \Delta l_3 \cos\alpha_2 - R_4(\sin\alpha_4 - \sin\alpha_2) - R_5(\sin\alpha_5 - \sin\alpha_4). \quad (5.125)$$

Профіль 5. Вихідні дані $H, A, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4 = \alpha_3 + \Delta\alpha_{3-4}, R_2, R_3$. Радіус кривизни R_4 четвертої ділянки та довжину вертикальної ділянки z_1 знаходять за формулами

$$R_4 = [A - R_2(1 - \cos\alpha_2) - R_3(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_3)] / (\cos\alpha_3 - \cos\alpha_4); \quad (5.126)$$

$$z_1 = H - R_2 \sin\alpha_2 - R_3(\sin\alpha_3 - \sin\alpha_2) - R_4(\sin\alpha_4 - \sin\alpha_3). \quad (5.127)$$

Проекції та довжини окремих ділянок направляючої частини профілю визначають за формулами табл. 5.37.

Горизонтальна частина профілю призначена для поздовжнього розкриття продуктивної зони нафтогазоносного пласта. Тому розрахунок геометричних параметрів цієї частини профілю має відповідати формі нафтогазонасиченої зони пласта і не виходити за її межі.

Горизонтальна частина профілю свердловини характеризується такими геометричними параметрами (рис. 5.129):

довжина проекції S горизонтальної частини на дотичну до початку цієї частини профілю;

радіуси R_j кривизни j -ї ділянки горизонтальної частини профілю;

граничні відхилення T_H та T_B горизонтальної частини профілю;

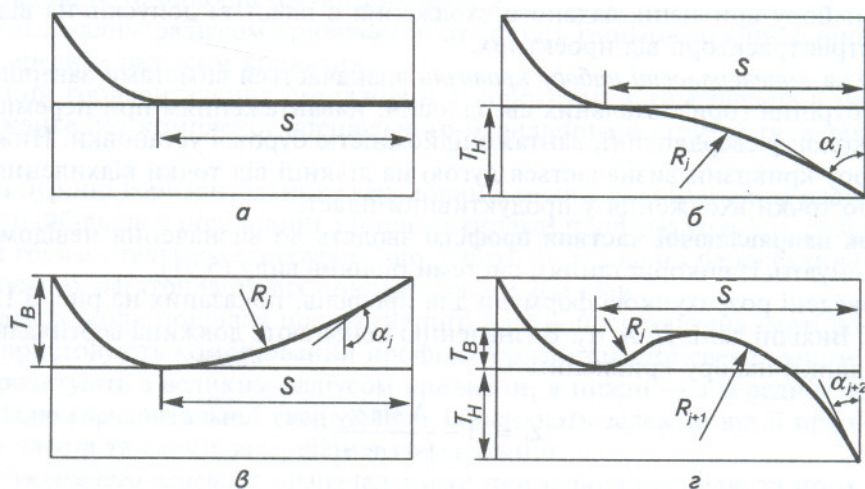


Рис. 5.129. Види горизонтальної частини профілю свердловин:
а—прямолинійна горизонтальна; б, в — у вигляді дуги; г—хвиляподібна

зенітний кут α_j у j -й точці горизонтальної частини профілю; проекції Δx_j і Δz_j та довжина Δl_j j -ї ділянки.

Нижче наведені формули для геометричних параметрів горизонтальних частин профілів.
Прямолінійна ділянка (рис. 5.129,а):

$$\begin{cases} \Delta x_j = S \sin \alpha_j; \\ \Delta z_j = S \cos \alpha_j; \\ \Delta l_j = S, \end{cases} \quad (5.128)$$

де S та α_j задані величини.

Для ділянки у вигляді випуклої дуги кола (рис. 5.129,б) заданими є величини S , α_{j-1} та T_H . Інші геометричні параметри визначають за такими формулами:

$$\begin{cases} R_j = \frac{T_H^2 + S^2}{2T_H}; \\ \Delta x_j = S \sin \alpha_{j-1} - T_H \cos \alpha_{j-1}; \\ \Delta z_j = S \cos \alpha_{j-1} + T_H \sin \alpha_{j-1}; \\ \Delta l_j = \frac{\pi R_j}{180} \arcsin \frac{S}{R_j}; \\ \alpha_j = \alpha_{j-1} - \arcsin \frac{S}{R_j}. \end{cases} \quad (5.129)$$

Для ділянки у вигляді опуклої дуги кола (рис. 5.129,в) при заданих величинах S , α_{j-1} та T_B невідомі геометричні параметри визначають таким чином:

$$\begin{cases} R_j = \frac{T_B^2 + S^2}{2T_B}; \\ \Delta x_j = S \sin \alpha_{j-1} + T_B \cos \alpha_{j-1}; \\ \Delta z_j = S \cos \alpha_{j-1} - T_B \sin \alpha_{j-1}; \\ \Delta l_j = \frac{\pi R_j}{180} \arcsin \frac{S}{R_j}; \\ \alpha_j = \alpha_{j-1} + \arcsin \frac{S}{R_j}. \end{cases} \quad (5.130)$$

Для хвиляподібної горизонтальної частини (рис. 5.129,г) три невідомі геометричні параметри траєкторії визначають за системою рівнянь

$$\begin{cases} (R_j + R_{j+1})[1 - \cos(\alpha_j - \alpha_{j-1})] = T_B; \\ R_{j+1}[1 - \cos(\alpha_{j-1} - \alpha_{j-1})] = T_H; \\ (R_j + R_{j+1})\sin(\alpha_j - \alpha_{j-1}) + R_{j+1}\sin(\alpha_{j-1} - \alpha_{j+1}) = S. \end{cases} \quad (5.131)$$

При заданих величинах S , T_B , T_H , α_{j-1} та R_j з (5.131) знаходять невідомі параметри

$$\begin{cases} R_{j+1} = \frac{4S^2 T_H - \xi \eta \pm \sqrt{(4S^2 T_H - \xi \eta)^2 - \xi^2 (\eta^2 + 8S^2 T_H^2)}}{\xi^2}; \\ \alpha_j = \alpha_{j-1} + \arccos \left(1 - \frac{T_B}{R_j + R_{j+1}} \right); \\ \alpha_{j+1} = \alpha_{j-1} - \arccos \left(1 - \frac{T_H}{R_{j+1}} \right), \end{cases} \quad (5.132)$$

де $\xi = 2(T_B - T_H)$;

$$\eta = 2T_H^2 - S^2 + 2T_B R_j - 2T_B^2.$$

У першому рівнянні (5.132) знак підкореневого виразу вибирається із умови існування розв'язку (5.131). Зрозуміло, що при від'ємному підкореневого виразу дійсного розв'язку не існує.

Проекції та довжини ділянок хвилеподібної частини профілю визначають за формулами табл. 5.37.

Приклад 5.23. Розглянемо розрахунок проектного профілю горизонтальної свердловини.

Вихідні дані: глибина свердловини по вертикалі $H = 2720$ м; проектне зміщення точки входження в пласт $A = 400$ м; профіль направляючої частини 1 (рис. 5.128); зенітний кут входження в пласт $\alpha_2 = 82^\circ$; профіль горизонтальної частини — хвилеподібний (рис. 5.129,е); довжина проекції горизонтальної частини $S = 600$ м; радіус кривизни першої ділянки горизонтальної частини $R_3 = R_2$; граничні відхилення горизонтальної частини $T_B = 60$ м та $T_H = 40$ м.

За формулами (5.118) та (5.119) визначимо невідомі геометричні параметри направляючої частини профілю

$$z_1 = 2720 - \frac{400 \sin 82^\circ}{1 - \cos 82^\circ} = 2260 \text{ м};$$

$$R_2 = \frac{400}{1 - \cos 82^\circ} = 485 \text{ м}.$$

Невідомі геометричні параметри горизонтальної частини профілю обчислимо за формулами (5.132).

Для допоміжних величин

$$\xi = 2(60 - 40) = 40 \text{ м} \quad \text{та} \quad \eta = 2 \cdot 40^2 - 600^2 + 2 \cdot 60 \cdot 485 - 2 \cdot 60^2 = 308200 \text{ м}^2$$

розв'язок першого рівняння відповідає знаку «—».

Тоді

$$R_4 = \frac{4 \cdot 600^2 \cdot 40 + 40 \cdot 308200 - \sqrt{(69928000)^2 - 40^2 (308200^2 + 8 \cdot 600^2 \cdot 40^2)}}{40^2} = 718 \text{ м};$$

$$\alpha_3 = 82^\circ + \arccos \left(1 - \frac{60}{485 + 718} \right) = 100,17^\circ = 100^\circ 10';$$

$$\alpha_4 = 82^\circ - \arccos \left(1 - \frac{40}{718} \right) = 62,78^\circ = 62^\circ 47'.$$

Обчислимо проекції та довжини ділянок траєкторії за формулами табл. 5.37 для направляючої та горизонтальної частин:

i	Δx_i , м	Δz_i , м	Δl_i , м
1	0	2260,0	2260,0
2	400,0	460,0	665,5
3	153,1	-2,9	153,8
4	455,2	68,2	468,6
	1008,3	2785,3	3547,9

5.8.2. ПРОЕКТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ БАГАТОВИБІЙНОЇ СВЕРДЛОВИНИ

Проектування траєкторії БВС здійснюється залежно від геологічної будови родовища, стану його розробки та експлуатації, режиму покладу та багатьох інших факторів. При цьому враховується досвід буріння, завершення та експлуатації таких свердловин (див. розділ 5.1.4).

На даний час відсутня узагальнена методика проектування траєкторій БВС для різноманітних гірничогеологічних та експлуатаційних умов.

А.Г. Калінін, Б.О. Нікітін, К.М. Солодкий та Б.З. Султанов запропонували методику розрахунку проектної траєкторії БВС відповідно до схеми, показаної на рис. 5.130.

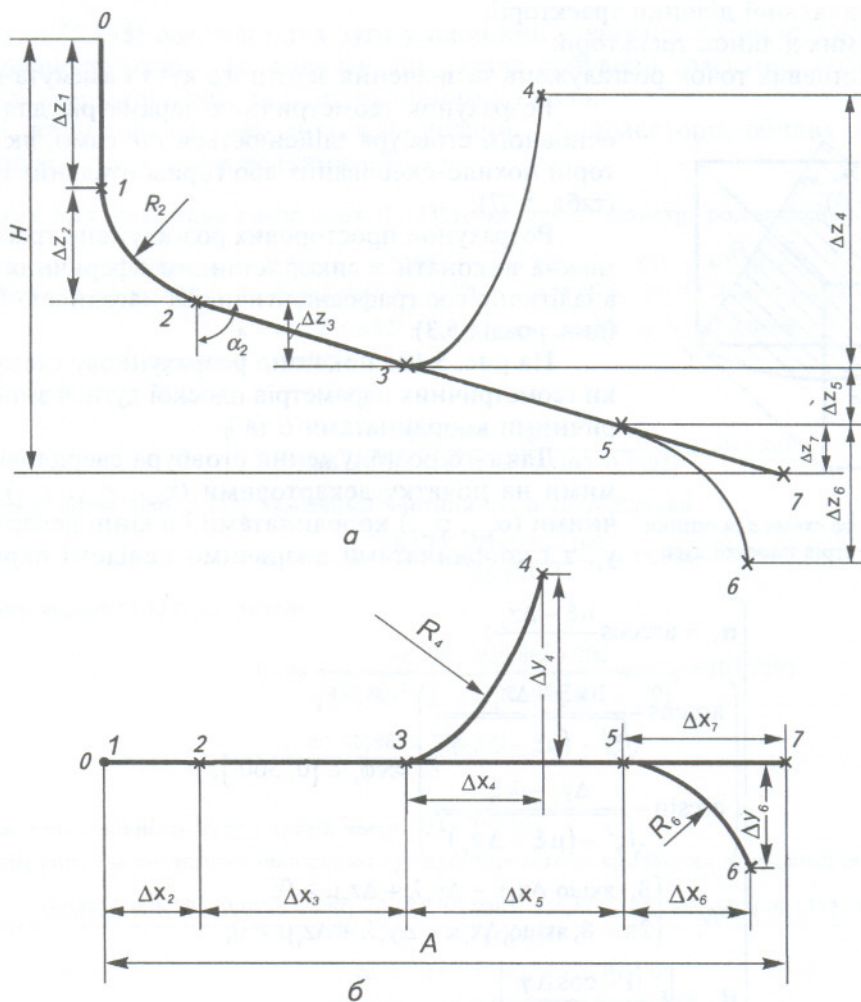


Рис. 5.130. Вертикальна (а) та горизонтальна (б) проекції траєкторії багатовибійної свердловини

Особливості даної методики:

траєкторія БВС у загальному випадку просторова та складається із вертикальної (0—1), набору зенітного кута (1—2) і умовно-горизонтальної (2—7) ділянок, а також ділянок розгалужень (3—4, 5—6) умовно-горизонтального стовбура;

моделями ділянок основного стовбура свердловини є відрізки прямої та дуги кола в апсидальній площині;

моделями ділянок розгалужень є дуги кіл з падінням або набором зенітного кута у довільних площинах.

Проектування траєкторії БВС зводиться до її вибору з урахуванням типових ділянок, обґрунтування та розрахунку геометричних параметрів ділянок. До вихідних даних належать:

глибина по вертикалі та відхилення від гирла свердловини початку умовно-горизонтальної ділянки;

радіус набору зенітного кута;

зенітний кут, азимут і довжина умовно-горизонтальної ділянки;

координати точок розгалужень основного стовбура свердловини;

геометричні параметри ділянок розгалужень.

Визначенню підлягають:

довжина вертикальної ділянки траєкторії;

проекції окремих ділянок траєкторії;

координати кінцевих точок розгалужень та значення зенітного кута і азимута в них.

Розрахунок геометричних параметрів для траєкторії основного стовбура здійснюється так само, як для траєкторій похило-скерованих або горизонтальних свердловин (табл. 5.37).

Розрахунок просторових розгалужень траєкторії БВС можна виконати з використанням сферичних координат аналітично або графоаналітично за методикою Г.Г. Семака (див. розділ 5.3).

На рис. 5.131 показано розрахункову схему для оцінки геометричних параметрів плоскої дуги зі змінними сферичними координатами α та φ .

Для g -го розгалуження стовбура свердловини з відомими на початку декартовими $(x_{r-1}, y_{r-1}, z_{r-1})$ та сферичними $(\alpha_{r-1}, \varphi_{r-1})$ координатами і в кінці декартовими (x_r, y_r, z_r) координатами визначимо невідомі параметри

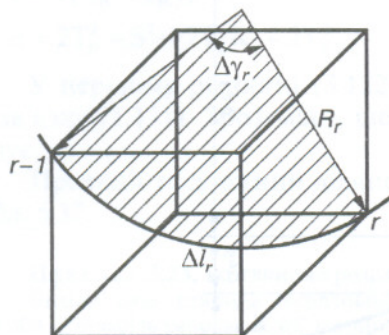


Рис. 5.131. Розрахункова схема для оцінки геометричних параметрів плоскої дуги

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_r = \arccos \frac{\mu \xi - \Delta z_r}{\xi}; \\ \left(\arccos \frac{\kappa \xi - \Delta x_r}{\sqrt{\xi^2 - (\mu \xi - \Delta z_r)^2}} \right) \Rightarrow \varphi_r \in [0, 360^\circ]; \\ \arcsin \frac{\Delta y_r - \lambda \xi}{\sqrt{\xi^2 - (\mu \xi - \Delta z_r)^2}} \end{array} \right. \quad (5.133)$$

$$\Delta \gamma_r = \begin{cases} \vartheta, & \text{якщо } \Delta x_r \kappa + \Delta y_r \lambda + \Delta z_r \mu \geq 0; \\ 2\pi - \vartheta, & \text{якщо } \Delta x_r \kappa + \Delta y_r \lambda + \Delta z_r \mu < 0; \end{cases}$$

$$R_r = \left| \xi \sqrt{\frac{1 - \cos \Delta \gamma_r}{1 + \cos \Delta \gamma_r}} \right|;$$

$$\Delta l_r = \frac{\pi R_r}{180} \Delta \gamma_r,$$

де $\Delta x_r = x_r - x_{r-1}$;

$\Delta y_r = y_r - y_{r-1}$;

$\Delta z_r = z_r - z_{r-1}$;

$\kappa = \cos \varphi_{r-1} \sin \alpha_{r-1}$;

$\lambda = -\sin \varphi_{r-1} \sin \alpha_{r-1}$;

$\mu = \cos \alpha_{r-1}$ — напрямні косинуси;

$$\xi = \frac{\Delta x_r^2 + \Delta y_r^2 + \Delta z_r^2}{2(\Delta x_r \kappa + \Delta y_r \lambda + \Delta z_r \mu)};$$

$$\vartheta = \arccos \frac{\kappa(\kappa\xi - \Delta x_r) + \lambda(\lambda\xi - \Delta y_r) + \mu(\mu\xi - \Delta z_r)}{\xi}.$$

Для однозначного визначення азимутального кута φ_r викривлення свердловини у точці $г$, а також кута просторового викривлення на ділянці в (5.133) наведені дві формули.

У загальному випадку проектна траєкторія БВС задається комбінацією відповідних розгалужень.

Формули (5.133) одержані для дуги у площині, утвореної дотичною до траєкторії в точці $г-1$ та кінцевою точкою $г$. Це означає, що задача побудови траєкторії розгалуження має два розв'язки: за частиною дуги та її доповненням до кола.

У разі, коли точка $г$ знаходиться на дотичній до траєкторії, обидва розв'язки вироджуються у відрізок прямої між точками $г-1$ та $г$.

Приклад 5.24. Визначимо з допомогою (5.133) геометричні параметри розгалуження від основного стовбура БВС.

Вихідні дані: $x_{г-1} = 190$ м; $y_{г-1} = 260$ м; $z_{г-1} = 2200$ м; $\alpha_{г-1} = 82^\circ$; $\varphi_{г-1} = 85^\circ$; $x_r = 390$ м; $y_r = 320$ м; $z_r = 2300$ м.

Обчислимо спочатку прирости координат $\Delta x_r = 200$ м; $\Delta y_r = 60$ м; $\Delta z_r = 100$ м, а також напрямні косинуси

$$\kappa = \cos 85^\circ \sin 82^\circ = 0,0863; \quad \lambda = -\sin 85^\circ \sin 82^\circ = -0,9865;$$

$$\mu = \cos 82^\circ = 0,1392$$

та величину

$$\xi = \frac{200^2 + 60^2 + 100^2}{2(200 \cdot 0,0863 - 60 \cdot 0,9865 + 100 \cdot 0,1392)} = -956,801.$$

За першою формулою (5.133) визначимо зенітний кут в кінці ділянки

$$\alpha_r = \arccos \frac{-0,1392 \cdot 956,801 - 100}{-956,801} = 75,894^\circ = 75^\circ 54'.$$

З другого виразу (5.133) одержимо

$$\arccos \frac{-0,0863 \cdot 956,801 - 200}{\sqrt{956,801^2 - (-0,1392 \cdot 956,801 - 100)^2}} = 107,729^\circ;$$

$$\arcsin \frac{60 - 0,9865 \cdot 956,801}{927,95} = -72,271^\circ,$$

що відповідає азимутальному куту у третій чверті $\varphi_r = 252^\circ 16'$.

За третім виразом аналогічно обчислимо кут просторового викривлення на ділянці розгалуження

$$\vartheta = \arccos \frac{0,0863(-956,801 \cdot 0,0863 - 200) - 0,9865(0,9865 \cdot 956,801 - 60) + 0,1392(-0,1392 \cdot 956,801 - 100)}{-956,801} = 13,896^\circ;$$

$$\Delta x_r \kappa + \Delta y_r \lambda + \Delta z_r \mu = -28,01 < 0;$$

$$\Delta \gamma_r = 360 - 13,896 = 346,104^\circ = 346^\circ 6'.$$

За останніми формулами (5.133) визначимо радіус кривизни

$$R_r = 956,801 \sqrt{\frac{1 - \cos 346,104^\circ}{1 + \cos 346,104^\circ}} = 116,6 \text{ м}$$

та довжину ділянки розгалуження

$$\Delta l_r = \frac{\pi}{180} 116,6 \cdot 346,104 = 704,3 \text{ м}.$$

Сферичні та декартові координати довільної точки траєкторії визначають за формулами, наведеними у розділі 5.3.3 для плоскої дуги.