

## Лекція. Інклінометрична зйомка свердловин

### 1. Підходи до інклінометричної зйомки свердловин.

При розв'язуванні гірничо-геометричних задач часто використовують результати *інклінометричної зйомки свердловин*.

Свердловини бурять в заданому (проектному) напрямі вертикально, похило або горизонтально. Через різні причини геологічного і технічного характеру свердловини в процесі буріння відхиляються від заданого напрямку, тобто викривляються.

Тому в процесі буріння необхідно весь час контролювати положення осі свердловини – вимірювати її викривлення.

Вимірювання, зв'язані з визначенням положення осі викривленої свердловини, мають назву "*інклінометрична зйомка свердловин*".

Прилади, які використовують при цьому, називають *інклінометрами*. Вони зазвичай входять в комплект приладів каротажних станцій, за допомогою яких геофізики досліджують бурові свердловини.

При зйомці викривлень свердловини визначенню підлягають такі величини:

– кут відхилення свердловини від прямовисного напрямку. Цей кут називають *зенітним кутом*  $\theta$  (рис. 1);

– горизонтальний кут  $\alpha$ , який називають *азимутом*, що характеризує простягання свердловини відносно деякого вихідного або орієнтовного напрямку  $ON$ ;

– довжина інтервалу  $l$  свердловини, до якого відносяться виміряні кутові величини  $\alpha$  і  $\theta$ .

Напрямок  $ON$  може бути напрямом магнітного меридіана або деяким умовним напрямом, від якого ведеться відрахунок кута  $\alpha$  за рухом годинникової стрілки.

При інклінометричній зйомці величини  $\theta$  і  $\alpha$  вимірюють в декількох точках приблизно на однакових відстанях одна від одної (інтервалах  $l$ ).

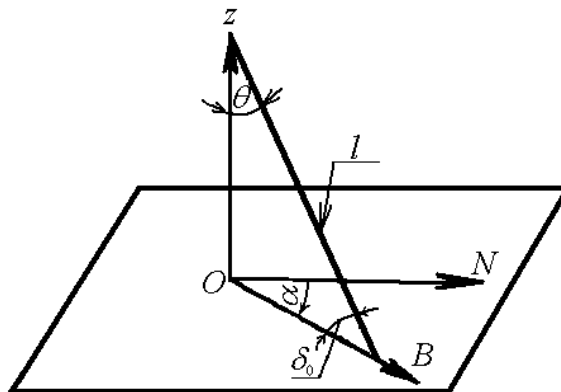


Рис. 1. Величини, які вимірюються при інклінометричній зйомці

Геологічними спостереженнями в свердловині визначають координати точок маркшейдерських спостережень.

Координати будь-якої точки на осі викривленої свердловини, в тому числі і координати точки зустрічі свердловини з пластом ( $x_k, y_k, z_k$ ) обчислюють за формулами, використовуючи середні значення  $\theta, \alpha$  та інтервалів  $l$ :

$$\left. \begin{aligned} x_k &= x_A + l \sum_{i=1}^n \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \cos \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ y_k &= y_A + l \sum_{i=1}^n \sin \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} \sin \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}; \\ z_k &= z_A - l \sum_{i=1}^n \cos \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $l$  – інтервал між точками виміру (часто  $l = 20$  м);

$\theta_i$  – зенітний кут осі свердловини в точці вимірювання;

$\alpha_i$  – дирекційний кут (азимут) осі свердловини в точці вимірювання.

Точність кутових вимірювань при інклінометричній зйомці не дуже висока, тому для визначення координат точок зустрічі похилої свердловини з пластом широко використовують *графічний спосіб*.

Спочатку знаходять горизонтальну  $d$  і вертикальну  $h$  проекції осі свердловини графічним способом по розрізі (рис. 2, а) або за формулами  $h = l \sin \delta, d = l \cos \delta$ ,

де  $l$  – похила довжина свердловини від устя до точки входу (або виходу) в поклад;

$\delta$  – кут нахилу осі свердловини до горизонту.

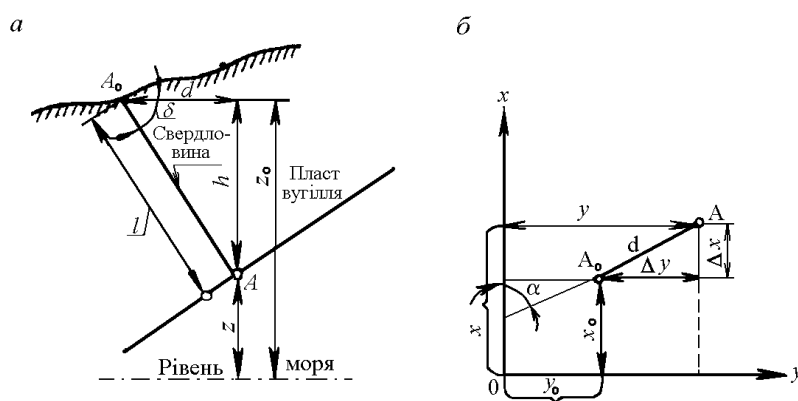


Рис.2. Визначення координат точки зустрічі похилої свердловини з пластом:  
а – розріз; б – план

За горизонтальною проекцією  $d$  і дирекційним кутом осі свердловини  $\alpha$  наносять точку зустрічі свердловини з поверхнею покладу на план (рис. 2, б) і за планом графічно визначають координати  $x$  і  $y$  шуканої точки.

При аналітичному розв'язуванні задачі спочатку обчислюють прирости координат за формулами:

$$\begin{aligned}\Delta x &= d \cos \alpha; \\ \Delta y &= d \sin \alpha; \\ \Delta x &= l \cos \alpha \cos \delta; \\ \Delta y &= l \sin \alpha \cos \delta,\end{aligned}\tag{2}$$

а потім обчислюють координати точки зустрічі за формулами:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + \Delta x; \\ y &= y_0 + \Delta y; \\ z &= z_0 - h,\end{aligned}\tag{3}$$

де  $x, y, z$  – шукані координати точки зустрічі свердловини з поверхнею покладу.

Вертикальні і похилі свердловини внаслідок викривлення відхиляються від заданого напрямку на значні кути. Якщо не враховувати викривлення свердловин, то положення точок зустрічі їх з пластами буде визначено з великими похибками, які досягають 100–150 м в горизонтальному і 10–20 м у вертикальному напрямках.

Координати точки зустрічі викривленої свердловини з поверхнею покладу визначають також графічним або аналітичним способом. При графічному визначенні координат точки зустрічі свердловини з пластом спочатку будують профіль осі свердловини (рис. 2.3) за даними вимірювання кутів відхилення свердловини від вертикалі  $\theta$  і похилою відстанню  $l$  між точками вимірювання цих кутів. За профілем свердловини визначають горизонтальні проекції  $d$  похилих відрізків свердловини  $l$  і різницю висот устя свердловини і точки зустрічі її з пластом  $\Delta z$ . Потім за дирекційними кутами викривлення свердловини  $\alpha$  і горизонтальними проекціями вимірюваних інтервалів  $d$  будують план свердловини (горизонтальну її проекцію), по якому визначають координати  $x$  і  $y$  точки перетину свердловини з пластом (див. рис.3). Координату  $z$  цієї точки визначають шляхом віднімання від відмітки устя свердловини величини  $\Delta z$ .

За даними горизонтальної проекції і профілю осі свердловини будують проекцію її на площину розрізу.

Кути викривлення свердловин вимірюються за допомогою спеціальних приладів, які називаються інклінометрами. Сучасні інклінометри дають можливість виконувати вимірювання зенітних кутів  $\theta$  з середньою похибкою  $\pm(20 \div 30)'$ , а вимірювання азимутів  $\alpha$  при кутах  $\theta > 15^\circ$  з середньою похибкою

ю  $\pm 5^\circ$ , при значенні  $\theta$  від 2 до  $15^\circ$  – з похибкою  $(20 \div 5)^\circ$ ; при зенітних кутах менше  $2^\circ$  виміри азимутів недостовірні.

Глибина свердловини вимірюється з середньою похибкою 1:200. З такою ж похибкою визначається відмітка точки зустрічі свердловини з пластом, а положення цієї точки на плані визначається з середньою похибкою 1:100 глибини свердловини.

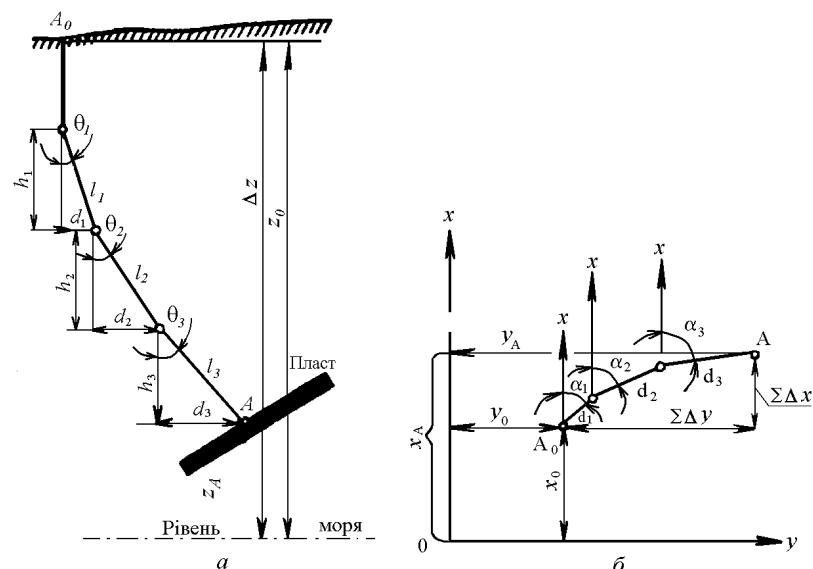


Рис. 3. Визначення координат точки перетину викривленої свердловини з пластом:  
*a* – профіль; *б* – план осі свердловини

## 2. Інклінометри: будова, принцип роботи та перспективи розвитку

Основний клас даних засобів застосовуються для вимірювання викривлень глибоких та досить глибоких свердловин

За методами вимірювання інклінометри поділяються на дві групи:

- безпосереднє вимірювання — основані на дії сили тяжіння, геомагнітного поля, гіроскопічного ефекту або на застосуванні телезондування;
- опосередкованого вимірювання — на використанні методів орієнтування з поверхні, сейсмічних, радіолокаційних, магнітометричних методів тощо.

Адаптація контрольно-вимірювальної апаратури інклінометрії вимагає чіткого усвідомлення недоліків і переваг тих чи інших способів вимірювань, врахування особливостей використання певних типів інклінометричних перетворювачів в конкретних умовах виконання робіт.

З урахуванням інтенсивного розвитку за останні кілька років технологій мікромеханічних акселерометрів та гіроскопів на тлі безперервного

поліпшення точності, експлуатаційних характеристик при постійному зниженні вартості робить їх придатним для використання в недорогих та компактних інклінометричних системах.

Базовим елементом сучасних приладів свердловинної інклінометрії є блок інклінометричного перетворювача, тип і параметри якого в значній мірі визначають функціональні можливості і область застосування апаратури та методики проваджуваних досліджень [64]. Критерії якості використовуваних перетворювачів - точність визначення вимірюваних величин, надійність і безвідмовність при впливі дестабілізуючих факторів (широкого діапазону термічних умов та атмосферного тиску, вібраційних навантажень різних амплітуд і частот). При конструюванні інклінометричних систем і приладів в автономному варіанті також необхідно враховувати їх габаритні параметри та енергоощадливість.

Застосовувані у гірництві інклінометричні прилади в основному використовують вимірювальні системи на основі комбінації трьох датчиків гравітаційного ( окремо по осях  $x$ ,  $y$  та  $z$ ) і трьох реєстраторів магнітного (ферозондового, магніторезистивного) типів. Максимальна точність вимірюваних параметрів для такого типу комплексу реєструючих елементів складає  $\pm 0,1^\circ$  при вимірюванні зенітного кута і  $\pm 0,5^\circ - 1^\circ$  для азимутального кута [91, 92]. Однак на практиці порядок точності нижче в кілька разів. Істотні недоліки таких вимірювальних систем пов'язані з сильними завадами електромагнітного поля від кар'єрної техніки та гірських порід з феромагнітними властивостями. Тому можливості застосування датчиків магнітного типу для оперативного контролю та досліджень траєкторії свердловини є досить обмеженими. Достатня точність вирішення багатьох завдань інклінометрії і відносна простота конструкції стали основними факторами використання даного типу датчиків в приладах, що одержали поширення в практиці вітчизняних геофізичних робіт. Визначення елементів орієнтації в свердловинах, при проведенні вимірювальних робіт в умовах безпосередній близькості до електромагнітних приладів та магнітних

матеріалів призводить до необхідності застосування в апаратурі гіроскопічних реєструючих датчиків.

Сучасні тенденції розвитку гіроскопічних інклінометричних приладів і систем умовно можна розділити на два напрями. Перший передбачає подальше вдосконалення традиційних електромеханічних приладів і методів обробки отриманої інформації, другий орієнтований на мінімізацію чутливих елементів шляхом застосування нанотехнологій і побудови датчиків з використанням нових фізичних ефектів.

Сучасний стан розвитку гіроскопічних приладів дозволяє створювати інклінометричну апаратуру на основі різноманітних гіроскопічних пристроїв: динамічно настроюваних; хвильових твердотільних; волоконно-оптичних; роторних механічних; лазерних гіроскопів; мікромеханічних, так званих MEMS-гіроскопів (Micro-Electro-Mechanical Systems) та ін. [83, 97].

Характеристика точності приладів свердловинної інклінометрії залежить від конкретних типів інклінометричних перетворювачів і характерних для них похибок. Різні чинники, сукупність дій яких призводить до похибок у вимірюваннях кутових параметрів, за своєю природою загальні для перерахованих вище типів гіроскопів і характеризуються технологічними недосконалостями виготовлення датчиків, зовнішніми температурними і вібраційними впливами [36, 47].

Найбільш істотний прояв похибок гіроскопічних датчиків - зміна показань при дрейфі нуля приладу, компенсація якого вимагає включення в методику польових досліджень процедур обов'язкової перевірки і калібрування блоку інклінометричної перетворювача, а також використання систем терморегулювання і віброзахисту в складі усієї системи. Необхідність періодичного метрологічного контролю апаратури зменшує можливий час роботи інклінометра в свердловині, що в деякій мірі звужує можливості гіроскопічної апаратури в області оперативного контролю положення осі свердловини. Незважаючи на ці обмеження гіроскопічних датчиків, цей напрям в інклінометрії свердловин розвивається особливо динамічно. Типові

експлуатаційні параметри для даної апаратури - працездатність при високій температурі до  $+ 85^{\circ} - 100^{\circ} \text{C}$ , при цьому забезпечуються вимірювання параметрів орієнтації свердловини з похибкою порядку  $\pm 0,1^{\circ} - 0,3^{\circ}$  (для зенітного кута) і  $\pm 0,3^{\circ} - 2^{\circ}$  (для азимутального кута).

Незважаючи на різноманітність типів інклінометричних перетворювачів і апаратурних рішень на їх основі, проблема створення високоточних, універсальних, простих в конструкції та експлуатації, недорогих засобів контролю просторового положення осі свердловини на сьогодні не вирішена. Зростаючі вимоги до експлуатаційних характеристик гіроскопічних приладів ставлять завдання не тільки удосконалення класичних гіроскопів з обертовим ротором, але і пошуку принципово нових принципів вимірювання кутових швидкостей. Останнім часом спостерігається практичний інтерес до мікромеханічних датчиків, безперервне поліпшення характеристик точності і експлуатаційних параметрів яких на фоні інтенсивного зниження вартості, дає передумови до створення малогабаритних, недорогих і досить точних інклінометричних пристроїв.

Мікромеханічні гіроскопи (ММГ) являють собою різні механіко-електричні або електромеханічні перетворювачі, розмір структурних елементів яких і їх переміщення в просторі вимірюються в мікрометрах (рис. 4).

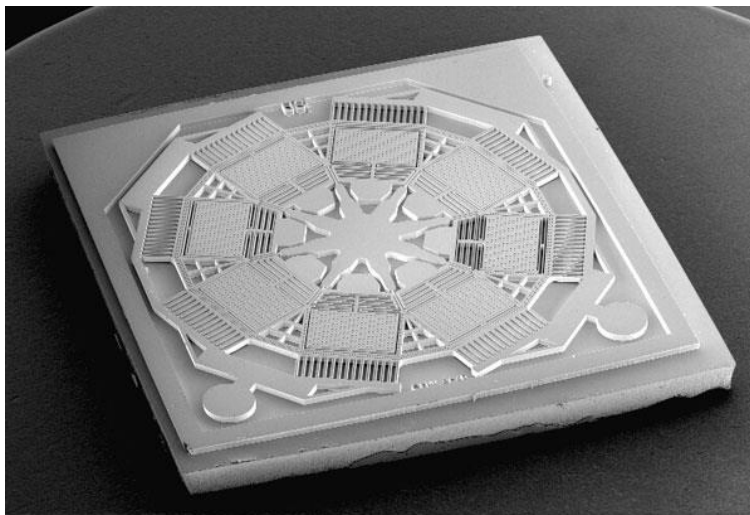


Рис. 4. Зображення внутрішніх інерційних частин мікромеханічного гіроскопа на мікропідвісах (розміри основи приладу 120x120 мікрон)

На поточному етапі розвитку мікромеханічні гіроскопи представлені різноманітними типами пружних підвісів чутливих до маси приладу. При цьому загальний принцип роботи ММГ полягає у створенні поступального або обертального руху чутливого елемента уздовж переміщень одного ступеня свободи і вимірювань переміщень іншого ступеня свободи, природа яких пов'язана з різними фізичними ефектами в полі дії кутової швидкості переміщення датчика [12]. Амплітуда переміщень є мірою вимірюваної кутової швидкості. Слід зазначити фактичну ідентичність побудови сучасних MEMS - гіроскопів і акселерометрів, відмінність яких полягає лише у представленні вихідних величин. В гіроскопічному датчику вихідною величиною є значення кутової швидкості по осях приладу, а акселерометру є поточні значення кута повороту. Нові тенденції в розвитку мікромеханічних компонентів передбачають створення інтегрованих приладів, структуру яких становить кілька різнотипних датчиків (прискорення, кутових параметрів, температури).

Досить компактний розмір та вкрай низькі значення споживаної енергії (в середньому 36 мВт) дозволяють створювати відносно прості інклінометричні системи для умов кар'єрів блочного каменю. Важливе значення для точності та зручності використання інклінометричних систем є їх конструкція механічної системи до якої кріпляться гіроскопічні датчики. Промислові інклінометричні прилади можна поділити на дві групи. До першої відносяться корпуси у вигляді подовженого металевого циліндру в якому жорстко кріпиться гіроскопічна система. Другий тип – більш коротші циліндри (зазвичай не більше 1200 мм) з розпірними важелями на роликах. Перша система призначена для визначення параметрів свердловин при глибинному бурінні і тому застосування її при вимірюванні шпурів глибиною усього 6 метрів є недоцільним та таким, що не забезпечить необхідної



точності. Крім того застосування таких пристроїв в сильно тріщинуватому скельному масиві може призвести до заклинювання приладу в середині свердловини. Другий тип приладів в якості центрування осі інклінометра використовує розпирні важелі з роликами попарно у верхній та нижній частинах. Даний тип інклінометрів використовується для вимірювань відхилення свердловин середньої довжини та позбавлений недоліків попереднього типу конструкції. До основних його недоліків слід віднести похибку центрування приладу при наявності природних та штучних нерівностей стінок свердловин (тріщини, розломи, каверни та включення).