

5.2. ФОРМУВАННЯ СТОВБУРА СВЕРДЛОВИНИ

5.2.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Якість буріння свердловин характеризується поряд з іншими показниками формою стовбура свердловини та її просторовою траєкторією. Форма свердловини визначає умови проходження свердловиною долота, КНБК, геофізичних приладів, бурильних та обсадних труб. Зміна форми поперечного перерізу, локальні викривлення, різкі зенітні та азимутальні викривлення траєкторії, наявність жолобних виробок або каверн часто бувають причиною заклинювань, зтяжок, прихватів, різних аварій, недоспуску обсадних колон до проектних глибин, передчасного їх зношування тощо. Зазор між стінками свердловини та обсадною трубою є важливим параметром, який враховується при проектуванні конструкції свердловини. В деяких випадках величина цього зазору значно зменшується внаслідок локальних викривлень стовбура, що на практиці призводить до необґрунтованого ускладнення конструкції свердловини.

Відхилення форми свердловини від циліндричної зумовлюється різними причинами. В процесі роботи на вибої долото зношується за діаметром, внаслідок чого діаметр свердловини на пробуреному інтервалі зменшується. При спуску нового долота з номінальним діаметром певну частину привибійного інтервалу свердловини доводиться проробляти, калібрувати. Оскільки поперечний переріз стовбура має відхилення від форми круга, то в процесі спуску шарошкове долото може прокрутитися і пройти через ділянки, в які плоский шаблон такого ж діаметра може не пройти. Перехід на буріння алмазними долотами після буріння шарошковими (і навпаки), як правило, супроводжується калібруванням стовбура і займає багато часу.

Однією із загальноприйнятих технологій буріння з небажаним викривленням є застосування жорстких стабілізуючих КНБК, які включають опорно-центруючі елементи (ОЦЕ), що контактують зі стовбуром свердловини. Такі компоновки сприяють поліпшенню форми стовбура та стабілізації отриманого напрямку свердловини. Проте їх застосування пов'язане з технічними та технологічними труднощами. Наприклад, непросто отримати при обертанні КНБК дійсно прямолінійну довгу, збалансовану компоновку з декількома ОЦЕ, оскільки в них можлива неспіввісність і перекошування різьбових з'єднань, особливо якщо компоновка збирається з коротких елементів. Складно проконтролювати прямолінійність такої компоновки у зібраному стані. Ймовірно, що стріла прогину довгої компоновки по долоту та центруючим елементам може перевищувати величини планових технологічних зазорів між стовбуром та цими елементами. Останнє підтверджується одностороннім зносом елементів компоновки.

ОЦЕ, як правило, охоплюють значно більший інтервал стовбура свердловини в осьовому напрямку, ніж долото. Якщо до того ж озброєння їх елементів розташоване на прямолінійних або спіралеподібних ребрах, то вони перекривають весь периметр стовбура в поперечному перерізі. Природно, що в процесі спуску компоновки у свердловину і ймовірність зависання цих елементів у стовбурі в порівнянні з ймовірністю зависання шарошкового долота є значно більшою, не дивлячись на те, що долото першим зустрічає перешкоду на шляху переміщення компоновки. Бажання підвищити жорсткість компоновки та зменшити технологічні зазори для

підвищення її стабілізуючого ефекту пов'язане з труднощами спуску компоновки у свердловину, інтенсивним зносом її елементів, збільшенням інтервалів необхідного калібрування стовбура, зависанням цих елементів на стінках свердловини, зниженням показників буріння.

Жорстку компоновку неможливо опустити у свердловину без калібрування нею стовбура по всьому інтервалу, якщо попередня компоновка була менш жорсткою або її ОЦЕ були розміщені інакше. Виключається також можливість застосування жорсткої компоновки для стабілізації отриманого напрямку свердловини після застосування відхилювачів, які забезпечують інтенсивне викривлення. Застосування жорсткої компоновки пов'язане з небезпекою заклинювання або прихвачування її у свердловині. На обертання компоновки з ОЦЕ витрачається додаткова енергія. Якщо до якості стовбура і траєкторії свердловини ставляться жорсткі вимоги, тоді витрата ОЦЕ збільшується, особливо при бурінні в умовах природного викривлення.

Наприклад, Прикарпаття характеризується складністю геологічної будови структур, частим перешаруванням порід із різною міцністю, значною анізотропією, низькими у порівнянні з іншими районами проходкою на долото та механічною швидкістю проходки. Великі труднощі виникають внаслідок інтенсивного викривлення. Те, що св. 1-Шевченково досягла глибини 7522 м, завдячується тому, що отримання якісної форми стовбура та траєкторії свердловини в цілому забезпечувалося застосуванням жорстких компоновок, які включали в себе калібратори і центратори.

Умови роботи твердосплавного озброєння шарошкових доліт і калібраторів є різними. При роботі долотом, що втратило первісний діаметр, наддолотний калібратор є прямим доповненням до породоруйнівного інструменту. Калібратор розширює стовбур свердловини, сприймаючи значну частину осьового навантаження. При наявності змін у формі стовбура калібратор постійно руйнує стінки стовбура, чим забезпечується проходження вниз компоновки. При цьому якісна форма стовбура свердловини досягається за рахунок зменшення техніко-економічних показників буріння свердловини.

У працях А.Г. Калініна показано, що об'єм зруйнованої калібратором породи досягає 10—12% від об'єму свердловини. При застосуванні осесиметричних калібраторів будь-якої конструкції повністю виключити руйнування стінок свердловини практично неможливо. Це не стосується ексцентричних калібраторів і центраторів конструкції С.Я. Саврея, розміщених у плані зверху на 120, 240 і 360° на розрахунковій відстані один від одного. В цій КНБК не руйнується пристовбурна частина масиву породи, а необхідна якість стовбура свердловини формується жорстко зцентрованим долотом.

У процесі роботи шарошкового долота руйнування породи дробильно-сколюючою дією відбувається при високих осьових навантаженнях. Озброєння звичайного безопорного калібратора руйнує стінки свердловини іншою дією — стираючо-ріжучою. Відомо також, що ефективність руйнування породи вказаною дією є різною. Якщо сьогодні у розпорядженні буровиків є набір доліт різних типів, призначених для руйнування порід різних твердості та абразивності, то вибір ОЦЕ обмежений. Природно, що робота цих елементів не може визнаватися ефективною. Оцінити резерви та підвищити віддачу від застосування калібраторів можна після детального вивчення умов їх роботи у взаємозв'язку з формою стовбура свердловини шляхом умілого конструювання та обґрунтованого застосування в складі різних компоновок.

Форма стовбура свердловини є чітко обумовленою, і відхилення її від ідеалізованої моделі може призвести до ускладнень при бурінні та кріпленні свердловин і значних матеріальних перевитрат.

Герметичне встановлення пакера у відкритому стовбурі можливе лише за наявності якісної форми стовбура свердловини. Цю операцію виконати неможливо, якщо поперечний переріз свердловини має овалоподібну чи багатокутову форму, або при наявності локальних викривлень стовбура.

5.2.2. МЕТОДИ ВИВЧЕННЯ ФОРМИ СТОВБУРА СВЕРДЛОВИНИ

Вивчення форми стовбура є важливою задачею інформаційного забезпечення процесу поглиблення свердловини. На основі цих даних уточнюються умови роботи КНБК і бурильної колони, заходи з попередження викривлення і керування напрямком свердловини, ре-

комендації для кріплення і цементування обсадних колон та технології освоєння продуктивних горизонтів в процесі буріння, розробляються методи попередження ускладнень та аварій і т. ін.

Форма стовбура свердловини може вивчатися з допомогою прямих і непрямих методів.

Прямі методи базуються на вимірюванні параметрів поперечного перерізу і траєкторії стовбура свердловини. Для цього використовують кавернометрію, профілеметрію, радіусометрію, фотографування і кінозйомку у свердловині, інклінометрію та інші методи (див. розділ 1.8, том I).

Кавернометрія дає інформацію про характер зміни усередненого (у двох взаємоперпендикулярних напрямках) діаметра свердловини з глибиною. За даними кавернометрії вважається, що поперечний переріз стовбура свердловини є круглим. Така інформація про контури свердловини не у всіх відношеннях може виявитися прийнятною. Наприклад, послідовна кавернометрія одних і тих самих ділянок стовбура свердловини може виявитися істотно різною. Це зумовлено відмінною від круга поперечним перерізом стовбура і можливістю переміщення по стінці свердловини важелів каверноміра різними шляхами.

Профілеметрія використовується для вимірювання діаметра стовбура свердловини у двох взаємно перпендикулярних площинах, а *радіусометрія* — для вимірювання контура поперечного перерізу свердловини з орієнтацією у просторі. Це дозволяє отримати більш повну інформацію про форму поперечного перерізу свердловини, характер її зміни з часом.

Радіусометрія дає змогу оцінити результати робіт з руйнування жолобних виробок спеціальними компоновками.

Фотографування і кінозйомка у свердловині дають змогу істотно поповнити інформацію про стовбур свердловини у реальних умовах. Необхідною умовою застосування цього методу є наявність оптично прозорого середовища.

У 80-х рр. минулого століття Г.Г.Семак і Р.С.Яремійчук розробили апаратуру для фотографування та кінозйомки стовбура свердловини при бурінні з продуванням вибою газоподібними агентами.

Результати випробування на свердловинах Прикарпаття підтвердили високу оптичну прозорість середовища свердловини, заповненої газоподібним агентом і можливість фотографування об'єктів, розташованих на значній відстані від об'єктива. Вирішальне значення мало рівномірне освітлення близьких і віддалених об'єктів фотографування.

Інклінометрія дає інформацію про траєкторію стовбура свердловини. За результатами вимірювань зенітного і азимутального кутів оцінюються координати стовбура свердловини. Це дає змогу керувати траєкторією свердловини в процесі буріння.

Профілеметрія поздовжнього перерізу стовбура свердловини дозволяє одержати інформацію про локальні викривлення.

На невеликих інтервалах траєкторія осі свердловини може бути охарактеризованою величиною відхилення її від відрізка прямої лінії, тобто амплітудою локальних викривлень, яка вимірюється на певній базисній відстані у двох взаємно перпендикулярних площинах. Під базисною відстанню розуміють довжину цього прямого відрізка. При цьому амплітуду відхилення осі свердловини слід вимірювати посередині відрізка.

Г.Г.Семак розробив на даній основі пристрій для вимірювання амплітуди локальних викривлень некавернозного стовбура (рис. 5.25). Вимірювані важелі з'єднані між собою попарно пружними тягами для забезпечення постійного їх розкриття (рівного номінальному діаметру свердловини) і синхронного переміщення. Нижні важелі забезпечують проходження пристрою вниз і вверх при постійно розкритих вимірювальних важелях.

Пристрій опускається у свердловину на каротажному кабелі. Довільна пара вимірювальних важелів зміщується відносно нейтрального положення і в некавернозному викривленому стовбурі. Величина зміщення дорівнює амплітуді викривлення осі свердловини на базисній відстані, тобто між центраторами. Зміщення, виміряне в двох перпендикулярних площинах, фіксується наземною апаратурою. Записи можна виконувати при переміщенні пристрою вниз і вверх.

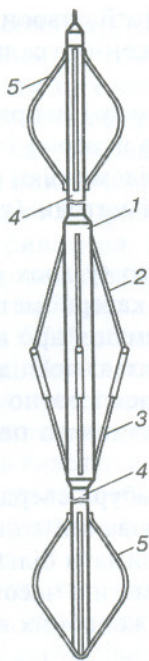


Рис. 5.25. Схема пристрою для вимірювання амплітуди локальних викривлень некавернозного стовбура:
1—прилад; 2, 3—верхні та нижні рухомі вимірювальні важелі; 4—штанги;
5—центратори

різницею діаметра калібратора і вписаного у згладжений багатокутник кола. Проте таке пояснення не є вичерпним.

У деяких випадках торцевий знос калібраторів перевищує величину можливого зносу, розрахованого з урахуванням вище поданого. На рис. 5.26 показана схема торцевого зносу калібратора в інтервалі інтенсивного одностороннього плоского викривлення свердловини. В процесі роботи калібратор спирається на односторонню полицку і при обертанні відбувається торцевий знос по всьому колу. Стінка стовбура руйнується лише з однієї сторони. Аналогічно можна пояснити торцевий знос і другого калібратора, розташованого вище, за стиснутих умов проходження прямої жорсткої компоновки у викривленому стовбурі. В практиці спостерігається торцевий знос другого калібратора, який не можна пояснити калібруванням стовбура багатокутної форми.

Торцеві зноси калібратора дають деяку інформацію про наявність інших форм стовбура. Більш характерним є знос калібраторів на конус (рис. 5.27, а) або на конус знизу і зверху при дещо більшому зносі нижньої сторони. На рис. 5.27, б показано калібратор, зношений до діаметра 227 мм знизу, 268 мм у середній частині і 230 мм зверху при первісному його діаметрі 295 мм. Діаметр відробленого долота становив до 292 мм. Час роботи у свердловині 9,5 год, в тому числі при калібруванні 5 год і при бурінні 4,5 год. Інтервал св. 21-Делятин, де використовували цей калібратор, представлений абразивними породами різної міцності. Зенітний кут свердловини не перевищує $2,5^\circ$. Калібратор встановлювали на відстані 1,6 м вище від вибою. Знос верхньої тильної сторони калібратора до діаметра, меншого за діаметр зношеного калібратора посередині, не можна пояснити розширенням свердловини. Такий знос може свідчити про нерівність стовбура, викликану різкими радіальними зміщеннями осі свердловини.

На рис. 5.28 показана форма некавернозної свердловини з віссю, яка має вигляд розтягнутої гвинтової лінії, що проектується на площину рисунка у синусоїду. Такою формою свердловини можна пояснити знос двох калібраторів на конус зверху і знизу. Модель свердловини

Вивчення форми стовбура свердловини на основі стендових досліджень процесу буріння дає змогу використовувати інструментальні методи вимірювань. Ступінь впливу різних факторів на формування стовбура свердловини визначається умовами моделювання досліджуваних процесів.

Непрямі методи базуються на вивченні побічних явищ, зумовлених їх впливом на форму і траєкторію стовбура свердловини або навпаки.

Знос долота за діаметром при розбурюванні твердих абразивних порід призводить до звуження стовбура, який у привибійній зоні свердловини може набувати конічної форми. Таке звуження стовбура ліквідується кожен раз при спуску нового долота. На проробку стовбура у звуженій частині витрачається додатковий час. У процесі розширення та його калібрування можливі заклинювання долота.

Характерний **торцевий знос калібраторів** часто спостерігається при бурінні в твердих та абразивних породах, тобто знос їх у діаметрі не по всій калібруючій поверхні, а лише з нижньої її сторони. Найпростіше пояснення цього полягає в тому, що калібрування зводиться до згладжування всіх сторін багатокутної або овалоподібної форми. В процесі роботи калібратор спирається на декілька бокових полицок, розташованих по всій боковій поверхні стовбура. Величина торцевого зносу визначається

ни, показана на рис. 5.28, є прикладом локально викривленої свердловини, що пропускає без силового контактування добре зцентровану (без зазору) жорстку компоновку, яка складається з долота та двох коротких ОЦЕ.



Рис. 5.26. Схема торцевого зносу калібратора в інтервалі інтенсивного одностороннього плоского викривлення свердловини



а.



б

Рис. 5.27. Характерний знос калібраторів:
а—на конус; б—на конус знизу і зверху при роботі в інтервалах інтенсивних локальних викривлень свердловини

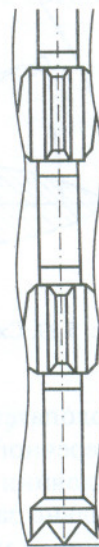


Рис. 5.28. Схема локально викривленого стовбура свердловини, що зумовлює знос калібраторів на двосторонній конус

Зміна динамічних навантажень на гак бурової установки в процесі СПО свідчить про форму стовбура свердловини. Ці зміни зумовлені ударами долота, ОЦЕ або замків бурильних труб об уступи на стінках свердловини, затяжками, підвищеними силами тертя. Уступи можуть виникати у процесі каверноутворень, формуватись долотом при переході в породу з більшою твердістю.

Траєкторія і форма стовбура свердловини впливають на величину крутного моменту на роторі в процесі буріння та його динамічну складову.

Форма керна, як зазначає багато дослідників, іноді характеризується певними особливостями (зігнутість, рифленість тощо). Природно, що і стовбур свердловини в інтервалі формування такого керна повинен мати такі самі особливості.

5.2.3. ФОРМУВАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ СТОВБУРА СВЕРДЛОВИНИ

У процесі буріння на долото і КНБК постійно діють різні, змінні за величиною і напрямком сили, які намагаються вивести дану систему з рівноваги. Під дією цих сил у певних умовах стовбур свердловини набуває разом із круглою циліндричною формою і багатокутну (за даними Ю.С. Васильєва, А.Г. Калініна) або овалоподібну (дослідження Т.Н. Бічуріна, Ю.Л. Боярка, Ф.А. Козлова, І.І. Кузнецової) форму.

Утворення багатокутних отворів вперше було виявлено в металообробній промисловості при свердлінні гарматних стволів, а пізніше і в буровій справі.

Механізм формування поперечного перерізу стовбура свердловини вивчався Ю.Л. Боярком, І.П. Дородновим, В.І. Єлгазіним, А.Г. Калініним, Є.О. Пражським, Л.А. Райхертом, Г.Г. Семаком, С.С. Сулакшиним, І.М. Фризом та іншими дослідниками. На рис. 5.29, за Є.О. Пражським і А.Г. Калініним, показані схеми формування поперечного перерізу стовбура свердловини при бурінні лопатевими долотами.

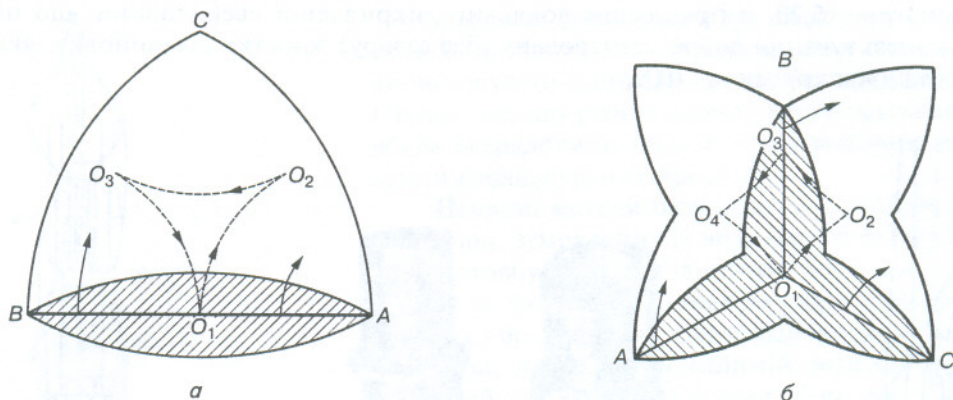


Рис. 5.29. Схеми формування поперечного перерізу стовбура свердловини дволопатеви́ми (а) і трилопатеви́ми (б) долотами

Для дволопатевого долота (рис. 5.29,а) можливе, за Є.О.Празьським, формування трикутного поперечного перерізу стовбура, який є результатом ударів ріжучих кромek долота об стінки свердловини з виробкою в ній поглиблень. Спочатку ці поглиблення можуть бути розподілені довільно за периметром, а потім вони групуються в трьох точках A , B і C . У цих точках розміщуються миттєві центри обертання долота, переміщення яких з однієї точки в іншу здійснюється стрибкоподібно в моменти ударів ріжучих кромek долота об вершини трикутника ABC .

При обертанні долота вправо його центр рухається за траєкторією $O_1O_2O_3$ вліво з кутовою швидкістю у 2 рази вищою. За Є.О. Празьським, площа трикутного сферичного вибою на 10% менша за площу вибою, що утворився би при нормальному обертанні.

При бурінні трилопатеви́м долотом можливе, за А.Г. Калініним, формування чотирикутного поперечного перерізу стовбура свердловини (рис. 5.29,б). У даному разі за один повний оберт долота відбувається 12 почергових ударів кромek лопатів об вершини формованого чотирикутника. Центр миттєвого обертання долота почергово розміщується у вершинах утвореної фігури і переміщується із однієї вершини в іншу стрибкоподібно у момент удару. Траєкторія переміщення центру долота $O_1O_2O_3O_4$ здійснює за один повний оберт долота вправо три оберти вліво. Площа утвореної поверхні вибою також менша за площу круга, який відповідає діаметру долота.

Г.Г. Семак і Р.С. Яремійчук відзначили недоліки наведених схем формування багатокутного поперечного перерізу стовбура свердловини:

- спрощення схем поперечного перерізу доліт;
- розташування миттєвих центрів форми траєкторій;
- кінематичні характеристики переміщення центра долота.

Ними на основі кінематики героторних гідравлічних машин узагальнені *схеми утворення поперечного перерізу стовбура свердловин*.

На рис. 5.30 показані 15 симетричних форм поперечних перерізів роторів (породоруйнівний інструмент) і статорів (стовбур свердловини). Ротори можуть обертатись у статорах при теоретично абсолютному і постійному в часі центруванні.

У стовпчику *I* розміщені статори з трикутною формою, у стовпчику *II* — чотирикутною і у *III* — п'ятикутною. В першому рядку розміщені моделі формування поперечного перерізу за Є.О. Празьським і А.Г. Калініним, третя модель їх доповнює для можливого чотирилопатевого долота і побудована за аналогічним принципом. У другому рядку всі ротори і статори мають кути, мінімально можливі для кожної симетричної фігури. В третьому рядку лінії всіх статорів мають прямі ділянки. У четвертому рядку наведений клас роторів і статорів із різкими заокругленнями. Цей клас займає проміжне положення між фігурами, розташованими в третьому і

п'ятому рядках. У п'ятому рядку показані статори з формою круга, в яких може обертатись клас роторів, що розглядається. На кожній фігурі наведено траєкторію переміщення центра ротора. Стрілками вказано напрямок переміщення цього центра вліво при обертанні ротора вправо. Окремою точкою і стрілкою вказано розміщення миттєвого центра обертання ротора вправо для даного його розміщення в статорі.

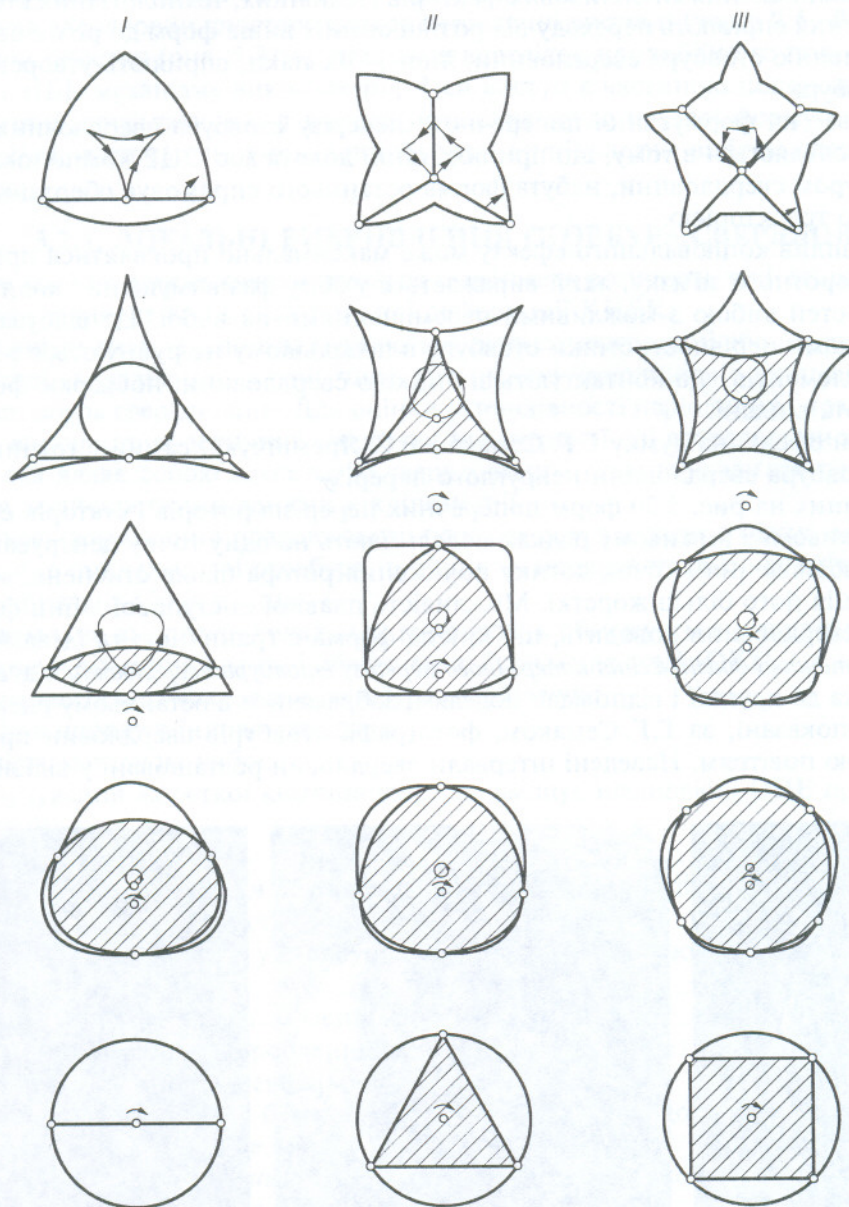


Рис. 5.30. Схеми симетричних форм поперечних перерізів роторів і статорів

Запропоновані Г.Г. Семаком і Р.С. Яремійчуком моделі формування поперечного стовбура свердловини (рис. 5.30) є більш досконалішими. У кожному разі ротор постійно дотикається всіх сторін статора і положення його жорстко зцентроване (на відміну від фігур у першому рядку). Центр ротора у запропонованих моделях описує траєкторію, близьку до кола. Це означає, що обертання ротора у статорі здійснюється рівномірно, без ударів.

Кожний з роторів, показаних на рис. 5.30, може обертатись у своєму або розташованому нижче статорі. При одному і тому ж роторі форма статора може видозмінюватися плавно. Можливість плавної зміни форми статора свідчить про те, що процес формування поперечного перерізу стовбура свердловини діалектично пов'язаний зі зміною різних умов.

Імовірність різних форм поперечного перерізу стовбура свердловини різна і визначається конкретними співвідношеннями впливових факторів (технічних, технологічних і геологічних). Деякі співвідношення сприяють переходу від розташованих вище форм до розташованих нижче, тобто заокругленню стовбура свердловини, інші — навпаки, сприяють утворенню некруглих перерізів стовбура.

Значно впливає на формування поперечного перерізу стовбура свердловини *копіювальний ефект*. Він проявляється в тому, що при обертанні долота або ОЦЕ компоновки, які контактують зі стовбуром свердловини, набута форма останнього спрямовує обертання інструменту за зумовленою траєкторією.

Негативний вплив копіювального ефекту може максимально проявлятися при збереженні позитивного зворотного зв'язку, який виражається у збігу фаз вимушених коливань КНБК внаслідок нерівностей вибою з можливими переміщеннями на вибої. Це відбувається, коли вироблені шарошками нерівності стінки стовбура в подальшому не руйнуються і не згладжуються; поверхня елементів, що контактують зі стінкою свердловини, повторює форму контурів шарошок долота в плані.

Копіювальний ефект, на думку Г.Г. Семака і Р.С. Яремійчука, самий істотний у сприянні формування стовбура свердловини некруглого перерізу.

Аналіз показаних на рис. 5.30 форм поперечних перерізів роторів і статорів свідчить, що розташовані у верхньому і нижньому рядках моделі мають на одну точку центрування менше, ніж проміжні. Зі збільшенням точок дотику положення ротора більш стиснене, місце розташування і орієнтація його більш жорсткі. Можливість плавної поступової зміни форми поперечного перерізу свердловини доводить, що кругла форма є граничною та ідеалізованою.

Промислові і стендові дослідження поперечного перерізу стовбура свердловини підтвердили, що його форма близька до круглої і відповідає моделям, зображеним в останньому рядку рис. 5.30.

На рис. 5.31 показані, за Г.Г. Семаком, фотографії стовбурів свердловин при бурінні з продуванням вибою повітрям. Наведені інтервали свердловин розташовані у відкладах стрий-

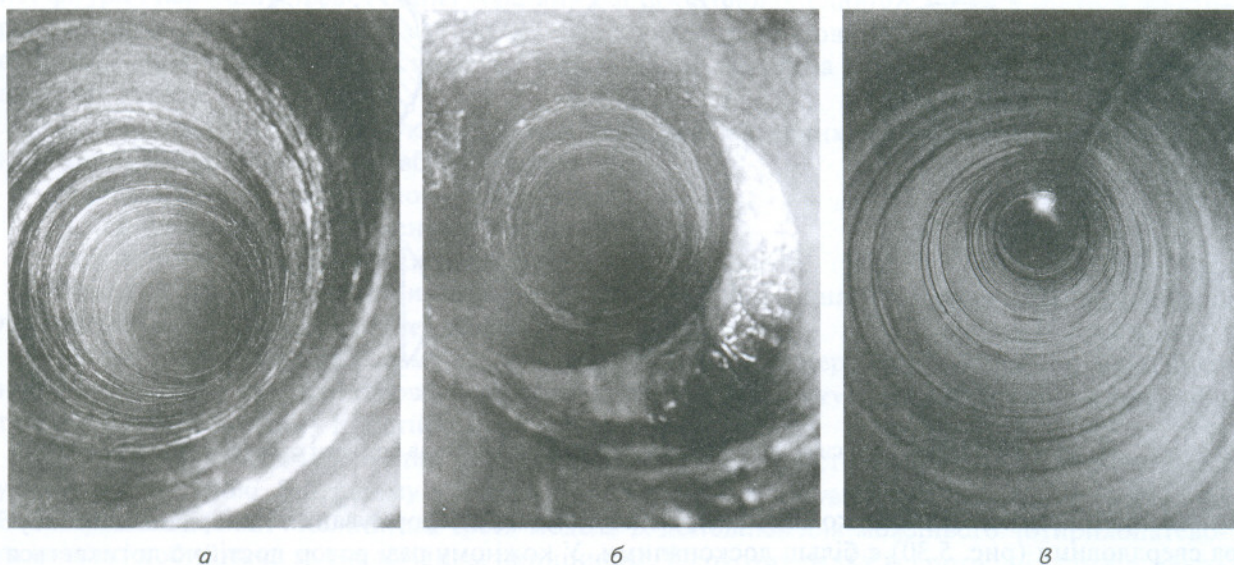


Рис. 5.31. Стовбур некавернозної свердловини при бурінні з продуванням вибою повітрям:
а—св. 2-Зелена, інтервал 160—168 м; б—св. 2-Зелена, інтервал 220—227 м;
в—св. 719-Битків, інтервал 775—783 м

ської світи, які представлені ритмічним чергуванням аргілітів, алевролітів і піщаників різної твердості при достатньо широкому діапазоні кутів падіння пластів. Буріння в цих породах характеризується інтенсивним викривленням свердловин.

Фотографування здійснювалось через 5—30 год після буріння цих інтервалів долотом діаметром 295,3 мм. Стовбури свердловин некавернозні, що підтверджено даними виконаної перед фотографуванням кавернометрії. Форма поперечного перерізу свердловин близька до круглої, у стінках свердловин спостерігаються періодичні виступи (через 0,5—0,8 м). Характерний серпоподібний виступ (рис. 5.31,б) утворився внаслідок привибиїного прироблення з використанням у КНБК механізму викривлення. Цей виступ є частиною попереднього вибою.

Аналогічні результати, які підтверджують близьку до круглої форму поперечного перерізу свердловини, в стендових умовах при бурінні ступінчастим вибоєм одержали Л.А. Райхерт та І.М. Фриз.

5.2.4. ЛОКАЛЬНІ ВИКРИВЛЕННЯ СТОВБУРА СВЕРДЛОВИНИ

Під *локальними викривленнями стовбура свердловини* розуміють такі згини її осі, форма яких не може бути відновлена в межах пружної деформації КНБК.

Локальними викривленнями вважаються різкі односторонні або періодичні викривлення некавернозної свердловини, в тому числі уступи, які утворилися в процесі неперервного формування стовбура свердловини. Для оцінки інтенсивності періодичних локальних викривлень може бути використана величина зміщення неперервної осі свердловини від умовної усередненої осі, яка являє собою траєкторію свердловини і характеризується параметрами, що визначаються за дискретними даними інклінометрії.

У процесі формування поздовжнього перерізу свердловини в одних випадках спостерігається хаотичне зміщення осі стовбура, в інших — проявляється тенденція до підсилення локальних викривлень або їх гасіння.

Максимальна амплітуда локальних викривлень обмежується умовою прохідності КНБК, тобто різницею діаметрів долота і обважнених бурильних труб (ОБТ).

Причини локальних викривлень стовбура свердловини:

- перехід в породу з іншою твердістю;
- наявність металу на вибої;
- прокручування жорсткої компоновки, яка вміщує неспіввісні ОЦЕ при бурінні вибиїними двигунами;
- утворення каверн;
- неправильний вибір місця розташування наддолотного калібратора при розбурюванні порід малої товщини різної твердості;
- спуск бурильної колони у стовбур свердловини, який пробурений КНБК з іншим розташуванням ОЦЕ;
- перехід на буріння долотом меншого діаметра;
- тривале привибиїне прироблення з відхилювачем або без нього і утворення уступу у вигляді залишеної частини попереднього вибою;
- нерівномірне подавання бурильної колони та виробка долотом і калібратором виїмок за рахунок ефекту виска та інше.

Механізм локальних викривлень є складним і може бути пояснений сумісним впливом факторів на процес формування стовбура свердловини.

Орієнтація більшості вимушених поперечних зміщень осі стовбура випадкова і не піддається контролю. Розвитку і підтримувannya процесу періодичних локальних викривлень сприяє копіювальний ефект в процесі формування стовбура свердловини.

Локальні викривлення є природним продовженням траєкторії долота при строго обумовленому переміщенні КНБК у викривленому стовбурі свердловини. Асиметричне руйнування вибою або фрезерування бокової стінки в процесі локальних викривлень слід вважати супутніми явищами, які здатні відхилювати траєкторію осі стовбура, що має строго обумовлену локально викривлену форму, від її природного продовження.

Можливість прояву копіювального ефекту ґрунтується на:
 мінімальному руйнуванні стовбура свердловини;
 жорсткості компоновки;
 відсутності каверноутворень стовбура в інтервалі розташування всієї КНБК;
 здатності породоруйнівного інструменту поглиблюватись з однаковою ефективністю в напрямку осі компоновки і під незначним кутом до цієї осі.

Запропоновані Г.Г.Семаком *математичні моделі формування локально викривленого стовбура* призначені для опису можливих геометричних форм осі свердловини з умов вільного проходження жорстких КНБК з точковими ОЦЕ.

Модель некавернозної свердловини з постійним діаметром визначається просторовою формою її осі. У моделі бурильної колони центри долота і повнорозмірних ОЦЕ переміщуються вздовж осі свердловини. Умова вписування КНБК у свердловині виражається знаходженням центрів долота і повнорозмірних ОЦЕ на прямій та їх зміщенням з кривою, що зображує вісь свердловини. Умова прохідності КНБК у стовбурі буде виконаною при постійному розташуванні цих центрів на прямій лінії в процесі їх синхронного переміщення на осі свердловини.

На рис. 5.32 показані деякі схеми плоских моделей осі локально викривленого стовбура свердловини. Точками A , B і C зображені долото і два повнорозмірні ОЦЕ, відрізок AC — модель КНБК, вісь Ox — усереднена вісь свердловини.

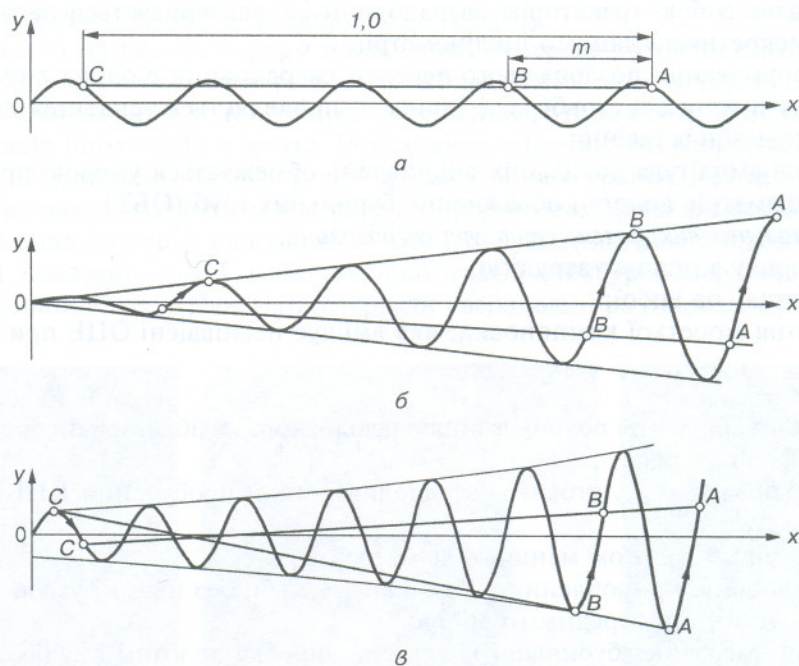


Рис. 5.32. Схеми можливих моделей осі локально викривленого стовбура свердловини

На рис. 5.28 показана схема свердловини з гвинтоподібною формою осі, у якій вільно проходить жорстка КНБК з двома ОЦЕ. В даному разі вісь компоновки при переміщеннях залишається паралельною усередненій осі свердловини, що відповідає наведеним на рис. 5.32, a моделі.

Можливі також форми стовбура, які задовольняють умові вільної прохідності жорсткої КНБК з ОЦЕ, при яких вісь компоновки може відхилюватись по відношенню до усередненої осі Ox свердловини. В даному разі прохідність КНБК зберігається також, коли вісь свердловини має вигляд синусоїди або спіралі з лінійно зростаючою чи зменшуючою амплітудою (рис. 5.32, b).

На рис. 5.32,в показана модель осі стовбура, в яку КНБК проходить при нахилі таким чином, що коли долото і перший ОЦЕ знаходяться, наприклад, на вершинах додатних півперіодів кривої, другий ОЦЕ розташовується на вершині від'ємного півперіоду. При цьому зміщення фаз двох ОЦЕ дорівнює половині довжини хвилі періодичної кривої. Зміна амплітуди таких форм осі стовбура не може бути лінійною.

Для побудови моделей можливих форм локальних викривлень стовбура свердловини Г.Г. Семаком запропонована рекурентна формула виду

$$y(x) = \frac{1}{1-m} y(x-m) - \frac{m}{1-m} y(x-1), \quad (5.1)$$

де x — нормована координата по відношенню до відстані між долотом і другим ОЦЕ (рис. 5.32).

Формула (5.1) справедлива для КНБК з двома ОЦЕ. Її можна використовувати для моделювання форм за наявності емпіричної інформації про локальні викривлення осі стовбура свердловини.

Приклад 5.3. На рис. 5.33 з використанням (5.1) побудована, за Г.Г.Семаком, форма осі локального викривлення стовбура свердловини. Відстані між долотом і ОЦЕ становлять відповідно 19 і 78 одиниць довжини. Початкове локальне викривлення стовбура свердловини, яке відповідає умові вписування КНБК, задане на рис. 5.33 пунктирною лінією, при цьому долото (точка A) і ОЦЕ (точки B і C) розташовані на усередненій осі свердловини (вісь Ox).

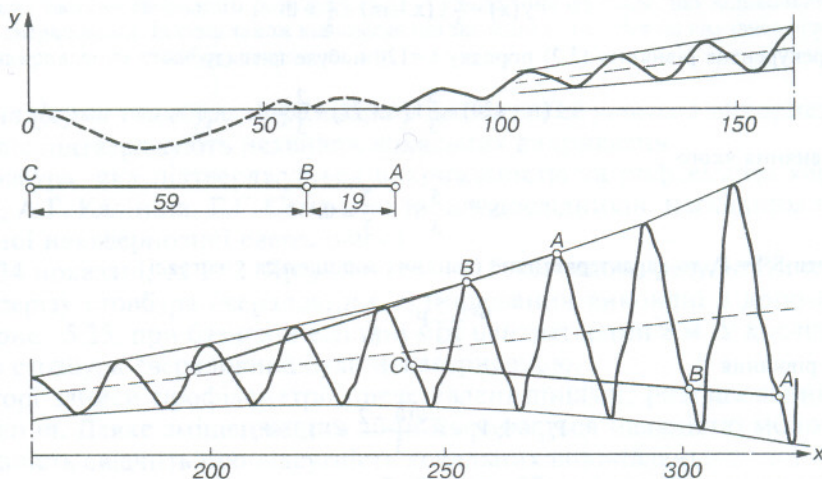


Рис. 5.33. Схема плоскої моделі форми осі локального викривлення стовбура свердловини

Розрахунок форми осі стовбура при $m = 19/78$ виконаний з кроком $1/78$ від довжини компоновки, тобто AC . Оскільки 19 і 59 — прості числа, то в таких умовах можуть існувати гармоніки без зсуву фаз точок A , B і C тільки вищих порядків із довжиною хвилі не більше $1/78$ від довжини компоновки.

Аналіз результатів обчислень показує, що спочатку спостерігається процес поступового перетворення довільної кривої у періодичну криву зі зростаючою амплітудою. Максимуми кривої повторюються через інтервали, приблизно рівні відстані між долотом і першим ОЦЕ, що вказує на наявність першої гармоніки з певним зсувом фаз точок B і C . Деяке спотворення гармонічної форми свідчить про наявність вищих гармонік з меншою амплітудою.

Аналогічна картина спостерігається і при інших співвідношеннях відстаней AB і BC .

Для аналітичного пошуку можливих плоских форм локально викривленого стовбура свердловини Г.Г.Семаком узагальнене рекурентне рівняння (5.1) у вигляді

$$f(n+k) + b_1 f(n+k-1) + \dots + b_k f(n) = 0, \quad (5.2)$$

де $f(m)$ — шукана функція цілочислового аргументу m ;

$b_1, \dots, b_k$ — дійсні постійні ($b_k \neq 0$).

Рівняння (5.2) вміщує значення шуканої функції в окремих точках інтервалу k . Величина k , що виражається цілим числом, визначає порядок рівняння (5.2).

Загальний його розв'язок

$$f(n) = C_1 S_1^n + C_2 S_2^n + \dots + C_k S_k^n, \quad (5.3)$$

де $C_1, C_2, \dots, C_k$ — довільні постійні, які визначаються з початкових умов;
 $S_1, S_2, \dots, S_k$ — корені характеристичного рівняння

$$S^k + b_1 S^{k-1} + \dots + b_{k-1} S + b_k = 0.$$

Якщо деякий корінь, наприклад S_1 , має кратність j , то відповідний член загального розв'язку (5.3) записується таким чином:

$$(C_1 + n C_2 + \dots + n^{j-1} C_j) S_1^n.$$

Приклад 5.4. Розглянемо, за Г.Г. Семаком, приклад побудови аналітичного розв'язку для КНБК із двома ОЦЕ при $m = 2/5$. Оскільки розв'язок рівняння (5.2) подається у вигляді функцій цілочислового аргументу, а потрібно визначити аналітичний вираз неперервної функції, то інтервал, рівний довжині КНБК, розділимо на достатньо велике число підінтервалів. Прийmemo $k = 120$, тоді $m = 48$.

Рекурентне рівняння (5.1) для даного випадку

$$y(x) - \frac{5}{3} y(x - m) + \frac{2}{3} = 0.$$

Узагальнене рекурентне рівняння (5.2) порядку $k=120$ набуде вигляду

$$f(n + 120) - \frac{5}{3} f(n + 72) + \frac{2}{3} = 0,$$

характеристичне рівняння якого

$$S^{120} - \frac{5}{3} S^{72} + \frac{2}{3} = 0.$$

Якщо прийняти $S^{24} = P$, то характеристичне рівняння запишеться у вигляді

$$P^5 - \frac{5}{3} P^3 + \frac{2}{3} = 0.$$

Корені цього рівняння

$$P_{1,2} = 1; P_3 = \frac{-\sqrt[3]{10} - 2}{3} \approx -1,3848;$$

$$P_{4,5} = \frac{\sqrt[3]{10} - 4}{6} \pm i \frac{\sqrt[3]{10}\sqrt{3}}{6} \approx -0,307 \pm 0,622i$$

або в тригонометричній формі

$$P_{4,5} = 0,694 [\cos(0,663\pi) \pm i \sin(0,663\pi)],$$

де $i = \sqrt{-1}$ — уявна одиниця.

Тут і нижче ірраціональні числа подаються з набагато більшою кількістю значущих цифр.

Корені характеристичного рівняння

$$S_{1, \dots, 24; 25, \dots, 48} = \sqrt[24]{1} = \cos \frac{2r\pi}{24} + i \sin \frac{2r\pi}{24};$$

$$S_{49, \dots, 72} = \sqrt[24]{-1,3848} = \sqrt[24]{1,3848} \left[\cos \frac{(2r+1)\pi}{24} + i \sin \frac{(2r+1)\pi}{24} \right];$$

$$S_{73, \dots, 96; 97, \dots, 120} = \sqrt[24]{0,694} \left[\cos \frac{(0,663 + 2r)\pi}{24} \pm i \sin \frac{(0,663 + 2r)\pi}{24} \right],$$

де $r = 0, 1, 2, \dots, 23$.

$$\begin{aligned}
 f(n) = & (C_1 + nC_2) \cos 0 + (C_3 + nC_4) \sin 0 + (C_5 + nC_6) \cos \frac{2\pi n}{24} + \\
 & + (C_7 + nC_8) \sin \frac{2\pi n}{24} + \dots + (C_{45} + nC_{46}) \cos \frac{22\pi n}{24} + (C_{47} + nC_{48}) \times \\
 & \times \sin \frac{22\pi n}{24} + \left(\sqrt[24]{1,3848}\right)^n \left[C_{49} \cos \frac{\pi n}{24} + C_{50} \sin \frac{\pi n}{24} \right] + \dots + \\
 & + \left(\sqrt[24]{1,3848}\right)^n \left[C_{71} \cos \frac{23\pi n}{24} + C_{72} \sin \frac{23\pi n}{24} \right] + \\
 & + \left(\sqrt[24]{0,694}\right)^n \left[C_{73} \cos \frac{0,663\pi n}{24} + C_{74} \sin \frac{0,663\pi n}{24} \right] + \dots + \left(\sqrt[24]{0,694}\right)^n \times \\
 & \times \left[C_{119} \cos \frac{(0,663 + 46)\pi n}{24} + C_{120} \sin \frac{(0,663 + 46)\pi n}{24} \right].
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Члени загального розв'язку, що включають постійні C_1, C_2, C_3 і C_4 , відображають пряму, тобто підтверджують очевидний факт прохідності КНБК з двома ОЦЕ у свердловині з прямою віссю.

Члени з постійними $C_5, \dots, C_{48}$ відображають гармонічні криві, амплітуда яких змінюється за лінійним законом, і відображають моделі осі свердловини, показаної на рис. 5.32,б.

Гармоніки з постійними $C_{49}, \dots, C_{72}$ характеризуються нелінійно зростаючою амплітудою. Такі моделі локально викривленої осі свердловини показані на рис. 5.32,в.

Остання група гармонік з постійними $C_{73}, \dots, C_{120}$ характеризується нелінійно спадаючою амплітудою.

Кожна складова частина загального розв'язку (5.4) — самостійна функція, що задовольняє умові прохідності КНБК по стовбурі свердловини. Їх сума також відповідає поставленій умові. Все це визначає різноманіття можливих форм локального викривлення стовбура свердловини.

Дослідження форми стовбура свердловини у промислових умовах з використанням прямих і непрямих методів підтверджують наявність локальних викривлень.

Форма стовбура, яка підтверджується викривленістю та рифленістю керна, є, на думку І.П. Дороднова, А.Г. Калініна, Г.Г. Семака та інших дослідників, наглядним прикладом локально викривленої некавернозної свердловини.

На рис. 5.34 показані, за Р.С. Яремійчуком і Г.Г. Семаком, результати профілометрії поздовжнього перерізу стовбура свердловини. Вимірювання виконані з допомогою пристрою, показаного на рис. 5.25, при базисній відстані між центраторами 8 м. У досліджуваному інтервалі відкритого стовбура свердловини була некавернозною.

У кондукторі записи профілометрії представлені лініями, розташованими біля лінії нульового відхилення. Деяке зміщення цих ліній пояснюється наявністю монотонного викривлення, а їх плавність свідчить про відсутність локальних викривлень.

У відкритому стовбурі свердловини одержані криві, які відхиляються від лінії нульового відхилення на різну відстань і в різні сторони. Це свідчить про те, що вісь свердловини відхиляється у різні сторони. Вектор локального викривлення осі свердловини може мати довільний напрямок, незалежний від зенітного та азимутального викривлень за даними інклінометрії.

На наявність локальних викривлень некавернозного стовбура вказують результати фотографування у свердловині при бурінні з продувкою (рис. 5.31). Нерівності стовбура свердловини у поздовжньому напрямку мають вигляд незначних, але доволі різких зміщень або виступів у одному напрямку. Їх поверхня освітлена значно краще. Виступи повторюються через 0,5—0,8 м і, напевне, розташовуються у місцях переходу в пропластки більшої твердості.

На рис. 5.31,в показано фотографію стовбура з підсвітленням лампою, яка розташована на відстані 10 м від об'єктива. Стовбур свердловини характеризується хвилеподібною поверхнею у вигляді виступів і западин у різні сторони. Періодичність виступів становить близько одного метра.

Г.Г. Семак на основі вивчення фотографій відкритого стовбура свердловин в умовах Прикарпаття дійшов таких висновків:

у поздовжньому перерізі локальні викривлення осі стовбура досягають 6%, що призводить до зменшення прохідного перерізу «у світлі» на 12% від номінального діаметра;

локальні викривлення, що призводять до зносу калібраторів на конус знизу і зверху, значно більші;

виступи можуть бути утворені за різних причин у процесі привибійного прироблення долота за рахунок його бокової фрезеруючої здатності.

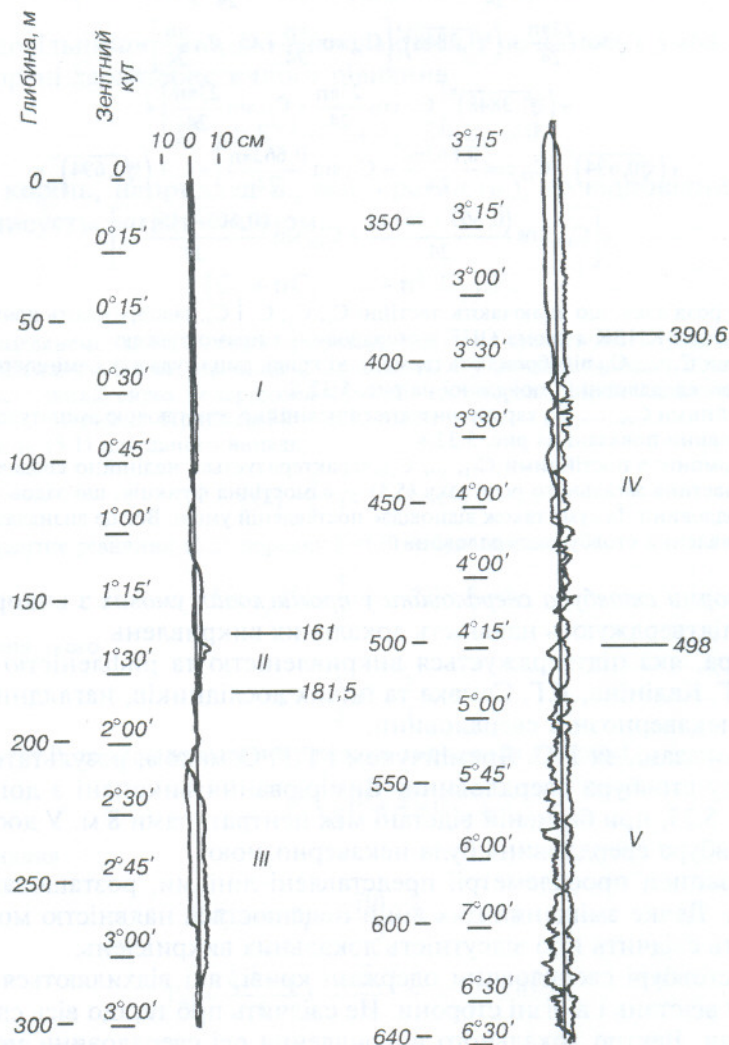


Рис. 5.34. Результати профілеметрії стовбура св. 712-Битків:

I—кондуктор; ділянка стовбура, пробурена з використанням КНБК (II—долото 295,3 мм; 240 мм електробур; ОБТ-203; III—долото 295,3 мм; КЛС-295; маховик 245 мм довжиною 5,9 м; ТРС-295; 240 мм електробур; ОБТ-203; IV—долото 295,3 мм; перехідник довжиною 0,9 м; 240 мм електробур; ОБТ-203; V—долото 295,3 мм; перехідник довжиною 0,9 м; МК-295, 240 мм електробур; телесистема; ОБТ-203)