

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ФАКУЛЬТЕТ ПРИРОДНИЧИХ НАУК ТА ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА НАФТОГАЗОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА БУРІННЯ

КОРОТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

З ДИСЦИПЛІНИ

«Оптимізація процесів спорудження свердловин»

освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр

для студентів спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології

Дніпро
НТУ «ДП»
2023

Короткий конспект лекцій з дисципліни «Оптимізація процесів спорудження свердловин» для студентів спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології / Є.А. Коровяка, О.М. Давиденко, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2023. – 35 с.

Автори:

Є.А. Коровяка, канд. техн. наук, доц.,
О.М. Давиденко, д-р. техн. наук, проф.,
А.О. Ігнатов, канд. техн. наук, доц.

Рекомендовано до видання науково-методичною комісією спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» (протокол № 5 від 04.07.2023).

Методичні матеріали призначені для самостійного вивчення дисципліни «Оптимізація процесів спорудження свердловин» освітньо-професійної програми «Нафтогазова інженерія та технології».

Рекомендації орієнтовані на активізацію виконавчого етапу навчальної діяльності здобувачів вищої освіти.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук, доц., доцент кафедри нафтової інженерії та буріння Расцветаєв В.О.

ЗМІСТ

	Вступ	4
1	Засоби і критерії оптимізації в розвідувальному й експлуатаційному бурінні	6
2	Технологічні рішення, спрямовані на оптимізацію процесу спорудження свердловин	7
3	Оптимізація параметрів режиму буріння свердловин різного призначення	9
4	Методики визначення оптимальних параметрів режиму і умов буріння свердловин різного призначення	14
5	Автоматизовані системи управління процесом спорудження свердловин	18
6	Методи математичної статистики і планування експерименту при пошуку оптимальних умов	24
7	Аналіз методів моделювання та ідентифікації технологічних процесів спорудження свердловин різного призначення	27
8	Удосконалення моделей технологічного процесу спорудження свердловин різного призначення для задач оптимізації керування	29
9	Структури системи оптимального автоматичного керування технологічними процесами поглиблення свердловин	30
10	Динамічна стійкість, геологічна інформативність та експлуатаційна ефективність процесу поглиблення свердловин	34
	Список літературних джерел	35

Вступ

Наша держава має потужну й розвинену мінерально-сировинну базу, що дозволяє їй з впевненістю займати провідні позиції серед країн, які спеціалізуються на видобутку різноманітних корисних копалин.

Розвиток та модернізація нафтогазової промисловості неодмінно супроводжується широким застосуванням бурових робіт – результатом виконання яких є спорудження свердловин з метою пошуку і розробки покладів вуглеводнів. У земній корі нафту і газ вміщують породи-колектори, які частково чи повністю обмежені слабопроникними породами. Найчастіше колекторами нафти і газу бувають піски, пісковики, вапняки і доломіти, рідше – ангідрити, сланці.

Необхідно підкреслити, що нафтові і газові свердловини є капітальними спорудами з високою вартістю, покликаними бути надійним об'єктом виконання відповідних робіт протягом певного значного часу. Свердловини виступають з'єднуючим каналом між продуктивними пластами та поверхневим устаткуванням; вони повинні характеризуватися герметичністю, міцністю, надійністю і довговічністю. Проте в реальних умовах, пробурений стовбур свердловини не є таким каналом, внаслідок складного впливу на нього: нестійкості гірських порід; наявності пластів, насичених різними флюїдами (вода, нафта, газ і їх суміші), які знаходяться під різним тиском; циркуляційних процесів промивальної рідини; руху бурового інструменту і приладів. Означені обставини потребують вжиття складних і трудомістких прийомів і методів, спрямованих на упередження або повне нівелювання прояву гірничо-геологічних ускладнень.

Головним завданням якісного спорудження свердловин є зниження термінів їх проводки, при одночасному зменшенні праце- і енергоємності робіт та капітальних витрат шляхом оптимізації виконання відповідних

робіт. Буріння свердловин - єдиний конкурентоспроможний метод результативної розробки та приросту видобутку вуглеводної сировини.

Математична теорія оптимізації пропонує допоміжний засіб, що робить можливим систематичну розробку рішень. Передумовою для використання цього допоміжного засобу є формулювання в математичних термінах відповідної задачі, тобто упорядкування математичного опису для обмежень, дій і досягнення мети шуканих рішень. Спектр галузей застосування, що припускають таку формалізацію, простирається від функціонування підприємств і державної економіки до інженерних наук і, зокрема, техніки управління і регулювання. Якщо клас проблем оптимізації буде тільки якось формалізований і буде показана їхня можливість розв'язання з використанням відповідних засобів, то відповідні алгоритми зможуть застосовуватися до широкого спектра спеціальних галузей, що можуть охоплювати як економіку держави, так і керування пристроями. Теорія оптимізації надає готові допоміжні засоби рішення, що можуть використовуватися після формулювання проблеми оптимізації. Але, не може бути виконана формалізація перекладу словесного формулювання задачі в математичні терміни, без застосування досвіду і кваліфікації постановника задачі.

В залежності від математичної форми проблеми оптимізації можуть виникати різноманітні альтернативи її рішення. Класифікація проблем оптимізації і методів може провадитися на основі різноманітних аспектів. Якщо мова йде про статичну область оптимізації, то відповідні методи і проблеми відносяться до області статичної оптимізації. Якщо ж, навпаки, шукані змінні рішення є функціями, наприклад, часу, то мова буде йти про динамічні проблеми оптимізації. Якщо ж, нарешті, задача оптимізації пов'язана зі стохастичними процесами, то необхідно говорити про методи стохастичної оптимізації.

1. Засоби і критерії оптимізації в розвідувальному й експлуатаційному бурінні

Процес нафтовидобутку безпосереднім чином пов'язаний з особливостями геологічної будови гірських порід, у яких залягають нафта й газ. Основні технологічні рішення для забезпечення безаварійності проводки свердловини та мінімізації негативного впливу на надра: вибір конструкції свердловини за графіком суміщених тисків, яка відповідає геологічним умовам буріння; розрахунок згідно норм густини бурового розчину по інтервалах буріння; розрахунок і підбір обсадних труб на максимально можливі пластові тиски; цементування обсадних колон високоякісними тампонажними матеріалами; установка на обсадні колони центраторів, скребків і турболізаторів для утворення надійного цементного кільця.

Процес оптимізації лежить в основі усієї інженерної діяльності, оскільки класичні функції інженера полягають у тому, щоб, з одного боку, проектувати нові, більш ефективні і менше дорогі технічні системи і, з іншого боку, розробляти методи підвищення якості функціонування існуючих систем. Ефективність оптимізаційних методів, що дозволяють здійснити вибір найкращого варіанта без безпосередньої перевірки всіх можливих варіантів, тісно пов'язана із широким використанням досягнень в галузі математики шляхом реалізації ітеративних обчислювальних схем, що спираються на суворо обґрунтовані логічні процедури й алгоритми, на базі застосування обчислювальної техніки. Тому для викладу методологічних основ оптимізації потрібно залучення найважливіших результатів теорії матриць, елементів лінійної алгебри і диференціального числення, а також положень математичного аналізу. Оскільки розмірність інженерних задач, як правило, достатньо велика, оптимізаційні методи орієнтовані головним чином на реалізацію за допомогою ЕОМ. Методи оптимізації ефективно застосовуються при проектуванні і керуванні технологічними процесами. При проектуванні

технологічних процесів і виробництв, а також систем керування вибираються найкращий метод виробництва, схема виробництва, технологічний режим, варіант системи керування. При експлуатації технологічних процесів і виробництв бажано забезпечити найкращий технологічний режим за допомогою оптимальної системи керування. Вихідною величиною при аналізі технологічних ланок з точки зору оптимального керування повинна служити техніко-економічна ефективність ведення процесу чи проектування. Рішення задач оптимізації з використанням технічних засобів, особливо ЕОМ пов'язано з коректною постановкою задачі оптимізації. Це особливо актуально в зв'язку з широким застосуванням систем автоматизації проектування (САПР) і автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП). Перша і відповідальна задача розробки алгоритмів прийняття оптимальних рішень при проектуванні і керуванні технологічних процесів, постановка задачі оптимізації. Від її грамотного формулювання в значній мірі залежить адекватність алгоритмів оптимізації.

Проблема оптимізації керування процесом буріння нафтових і газових свердловин є об'єктом постійної уваги вітчизняних і зарубіжних дослідників. Заплановане підвищення обсягів пошуково-розвідувального буріння на акваторіях і на суходолі вимагає підвищення якості процесів оптимального керування і висуває як одну з найбільш актуальних задач необхідність дослідження та удосконалення математичних моделей, зокрема, математичної моделі процесу буріння свердловин. Це, в свою чергу, вимагає більш детального вивчення цього процесу як об'єкта контролю і керування. Проте, процес буріння нафтових і газових свердловин вивчений ще недостатньо як в експериментальному, так і в теоретичному плані.

2. Технологічні рішення, спрямовані на оптимізацію процесу спорудження свердловин

Бурова установка, за допомогою якої здійснюється технологічний

процес буріння свердловини, є складним об'єктом керування та оптимізації з багатьма каналами передачі як керуючих впливів, так і збурень, які зумовлені взаємодією системи з навколишнім середовищем і унікальними властивостями самої бурової установки. Результатом дії вхідних впливів є чинники, які характеризують стан об'єкта керування, ефективність процесу буріння та його техніко-економічні показники. Виявлення керуючих впливів є складною науково-прикладною задачею, роз'язок якої визначається не тільки складністю системи та її фізичною природою, але й метою керування. Керуючі впливи повинні бути такими, щоб перевести систему із деякого початкового стану у визначений кінцевий стан таким чином, щоб була досягнута мета керування, а саме – безаварійне спорудження свердловини проектної глибини і визначеної конструкції у задані терміни і з мінімальними витратами. Досягається ця мета у процесі спорудження свердловини за допомогою керуючих впливів, які діляться на дві групи.

Перша група – це типи бурової установки, вишки, лебідки, кран-блоку, талевого блоку, вертлюга, ротора, типорозміри труб, кількість насосів, типорозмір доліт, компоновка низу бурильної колони, оснастка талевої системи. Вони є елементами технічного керування. Більшість елементів технічного керування вибираються на стадії проектування спорудження свердловини і в подальшому залишаються незмінними. У залежності від глибини змінюються лише тип і розміри доліт, оснащення талевої системи, компоновка низу бурильної колони.

Друга група – це параметри режиму буріння (осьова сила на долото, швидкість його обертання, кількість та якість промивальної рідини). Вони є елементами технологічного керування. Елементи технологічного керування можна цілеспрямовано змінювати з метою досягнення необхідних показників у кожному рейсі долота з урахуванням обмежень, встановлених геолого-технічним нарядом на свердловину.

Для того, щоб використати математичні результати і чисельні методи теорії оптимізації для рішення конкретних інженерних задач, необхідно встановити межі системи, що підлягає оптимізації, визначити кількісний критерій, на основі якого можна зробити аналіз варіантів із метою виявлення оптимального, здійснити вибір змінних, що використовуються для визначення характеристик і ідентифікації варіантів, і нарешті, побудувати модель, що відображає взаємозв'язки між змінними. Ця послідовність дій складає зміст процесу постановки задачі оптимізації. Коректна постановка задачі служить ключем до успіху оптимізаційного дослідження й асоціюється в більшому ступені з мистецтвом, ніж із точною наукою. Для правильної (коректної) постановки задачі оптимізації необхідне виконання умов: наявність одного критерію оптимальності; наявність у об'єкті оптимізації ступенів свободи, для об'єкту керування – керуючих впливів; можливість кількісної оцінки оптимізуємої величини. Постановка задачі оптимізації передбачає існування конкуруючих властивостей об'єкту. Вибір компромісного рішення і представляє у таких випадках процедуру рішення оптимальної задачі. В часткових задачах оптимізації, коли потрібно отримати екстремальні значення якого-небудь параметра оптимізації, конкуруючі властивості можна і не виявити.

3. Оптимізація параметрів режиму буріння свердловин різного призначення

За цільовим призначенням бурові свердловини класифікують на три основні категорії: геологорозвідувальні, експлуатаційні і технічні.

Перша категорія – геологорозвідувальні свердловини, що проводяться для вивчення родовищ корисних копалини або з метою вивчення геологічної будови певного району.

Геологорозвідувальні свердловини за цільовим призначенням

підрозділяються на такі різновиди:

1. Картувальні свердловини – бурять при проведенні геологічної зйомки з метою оголення корінних порід, по яких ведеться геологічне картування, в районах, де ці породи приховані шаром наносів.

2. Пошукові свердловини – бурять з метою визначення наявності або відсутності в даному районі тої або іншої корисної копалини.

3. Розвідувальні свердловини – бурять з метою оконтурювання і визначення запасів корисної копалини на даному родовищі.

4. Гідрогеологічні свердловини – бурять з метою вивчення підземних вод, умов їх залягання, можливого дебіту і хімічного складу.

5. Артезіанські свердловини – є різновидом гідрогеологічних свердловин, пробурених на напірні води пластів.

6. Інженерно-геологічні свердловини – бурять для розкриття верхніх горизонтів земної кори з метою складання геологічного розрізу, випробувань фізико-механічних властивостей ґрунтів у свердловині і відбору зразків ґрунтів з непорушеною структурою для визначення їх властивостей у лабораторних умовах для потреб промислового та цивільного будівництва.

7. Сейсмічні свердловини – бурять при сейсмічній розвідці, для проведення підземних вибухів, у результаті яких за допомогою сейсмографів визначають глибину і кути падіння пластів.

8. Параметричні свердловини – бурять з метою вимірювання параметрів геофізичних властивостей гірських порід і температури в умовах природного залягання порід і вивчення глибинної будови можливих зон нафтогазо-накопичення.

9. Структурні свердловини – бурять з метою вивчення геологічних структур і елементів залягання (потужності, кутів падіння і простягання) пластів порід, для контролю й уточнення даних геологічної і геофізичної зйомок.

10. Опорні свердловини – бурять в межах площ, геологічна будова яких не висвітлена бурінням для геологічної зйомки, пошуків, регіонального

вивчення глибинної геологічної будови, рудоносності або нафтогазоносності глибоких горизонтів.

Друга категорія – експлуатаційні свердловини, що проводяться для видобування з надр рідких (питна або мінералізована вода, нафта) і газоподібних корисних копалин. Сюди відносяться такі різновиди:

1. Водозабірні свердловини – для водопостачання міст, промислових підприємств, курортів, сільського господарства, залізничного транспорту.
2. Нафтові та газові свердловини – для видобутку нафти і газу.
3. Свердловини підземної газифікації вугілля – для отримання горючих газів шляхом неповного згорання вугілля безпосередньо в масиві вугільного родовища. Отримувані гази використовуються як паливо або сировина в хімічній промисловості.
4. Свердловини для видобутку розсолів, що залягають в колекторах земної кори, слугують для вилуговування різних солей: бромові, йодові та ін.
5. Геотехнологічні свердловини – буряться з метою гідродинамічного руйнування гірських порід, що містять корисні копалини, або з метою нагнітання в свердловину розчинів кислот, які розчинюють мінерали корисної копалини з подальшим винесенням її на поверхню.

Третя категорія – технічні свердловини, що буряться для різних технічних цілей. До них належать такі різновиди:

1. Підривні свердловини – призначені для розміщення в них зарядів вибухової речовини з метою відділення корисної копалини або породи від масиву при проведенні вибуху на відкритих або підземних гірничих роботах. Шпурами називаються підривні свердловини малих розмірів: діаметром від 30 до 60 мм і глибиною до 5 м.
2. Стовбури шурфів і шахт, пройдені в гірських породах бурінням.
3. Свердловини для заморожування ґрунтів – пробурюють по кільцю навколо стовбура майбутньої шахти для заморожування водоносних порід перед проходкою шахтного стовбура й усунення тим самим затоплення водою

шахти під час її проходження та зведення водотривкого кріплення. Заморожування водоносних порід при цьому здійснюється шляхом спуску труб в пробурені свердловини і циркуляції по цих трубах охолодних розчинів.

4. Свердловини для зміцнення ґрунтів – при будівництві шляхом нагнітання в тріщинуваті породи цементного розчину, різних смол або рідкого скла.

5. Водознижувальні або дренажні свердловини – призначені для дренажу, тобто для осушення кар'єру, родовища або ділянки під будівництво шляхом зниження рівня підземних вод.

6. Водоспускні свердловини – для спуску води з одного підземного горизонту в інший при осушенні гірничих виробок, а іноді й цілих водоносних пластів.

7. Нагнітальні свердловини – слугують для організації нагнітання води, повітря або нафтового газу в оконтурену зону нафтового покладу з метою вчинити тиск на нафту і поліпшити приплив нафти в цьому покладі до експлуатаційної свердловини.

8. Спостережні свердловини – слугують для здійснення систематичного контролю за зміною рівня води у свердловині або за зміною тиску рідині або газу в процесі експлуатації нафтогазоносного пласта.

9. Внутрішньопластові свердловини – бурять з підземних виробок по пластах з метою їх дегазації і знепилювання вугілля під час його виїмки шляхом нагнітання води через ці свердловини у вугільний пласт для його зволоження.

10. Допоміжні свердловини – слугують для вентиляції виробок, прокладки трубопроводу з метою подачі стислого повітря від компресора на земній поверхні до пневмомашин у гірничих виробках, спуску кріпильних лісоматеріалів, а також для гасіння підземних пожеж.

Цільові призначення свердловин можуть об'єднуватися або змінюватися під час бурових робіт. Наприклад, опорна свердловина може об'єднувати ці-

льові призначення пошукової, структурної і параметричної свердловин; пошукова або розвідувальна свердловина на воду, нафту або газ може стати експлуатаційною тощо.

Відповідно до класифікації бурових свердловин за цільовим призначенням існують три різновиди буріння свердловин: розвідувальне, експлуатаційне і технічне.

Кількісна оцінка оптимізованої якості об'єкту називається критерієм оптимальності. У інженерних задачах звичайно вибираються критерії техніко-економічного характеру. Проте спектр можливих формулювань таких критеріїв дуже широкий; при визначенні критерію можуть використовуватися такі економічні характеристики, як валові капітальні витрати, витрати в одиницю часу, чистий прибуток в одиницю часу, прибутки від інвестицій, відношення витрат до прибутку. У інших задачах критерій може ґрунтуватися на деяких технологічних факторах, наприклад, коли потрібно мінімізувати тривалість процесу виробництва виробу, максимізувати темпи виробництва, мінімізувати кількість споживаної енергії, максимізувати навантаження і т.п.. Незалежно від того, який критерій вибирається при оптимізації, “найкращому” варіанту завжди відповідає мінімальне або максимальне значення характеристичного показника якості функціонування системи. Тільки один критерій може використовуватися при визначенні оптимуму, тому що неможливо одержати рішення, що, наприклад, одночасно забезпечує мінімум витрат, максимум виходу продукту і мінімум споживаної енергії. Один із шляхів урахування сукупності суперечливих цільових настанов складається в тому, що якийсь із критеріїв вибирається в якості первинного, тоді як інші критерії рахуються вторинними. У цьому випадку первинний критерій використовується при оптимізації як характеристична міра, а вторинні критерії породжують обмеження оптимізаційної задачі, що встановлюють діапазони змін відповідних показників від мінімального до максимального прийняттого значення.

Кожна свердловина, яка буриться (пошукова, розвідувальна,

експлуатаційна та ін.) є унікальною за гірничо-геологічними умовами і споруджується за умов суттєвої апріорної та поточної невизначеності щодо її параметрів і структури. Основним процесом, який виступає об'єктом оптимізації за допомогою технологічних моделей, є процес взаємодії долота з гірською породою на вибої свердловини. Цей процес є двоєдиним, оскільки одночасно з руйнуванням породи відбувається зношування долота. Він залежить від багатьох факторів: фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід, пластового тиску, глибини свердловини, керуючих впливів та ін. Тому основним завданням створення технологічних моделей процесу буріння є дослідження ефективності роботи долота на вибої свердловини з метою створення такого оптимального технологічного обладнання, яке забезпечувало б якісне спорудження нафтових і газових свердловин з мінімальними витратами.

4. Методики визначення оптимальних параметрів режиму і умов буріння свердловин різного призначення

В умовах сучасного етапу розвитку галузі, глибокі нафтогазові свердловини бурять обертальним способом з передачею обертання долота з гирла свердловини від ротора через колону бурильних труб або з передачею обертання долота безпосередньо від валу (чи через низ бурильної колони) гідравлічного або електричного забійного двигуна - турбобура, гвинтового бура або електробура.

Основні вимоги до оптимального вибору способу обертання долота визначаються необхідністю забезпечення успішної проводки стовбура свердловини при можливих ускладненнях з високими техніко-економічними показниками.

Метою оптимізації є пошук найкращого або “оптимального” рішення. Хоча звичайно випадає задовольнятися поліпшенням відомих вирішень, а не доведенням їх до досконалості. Тому під оптимізацією розуміють скоріше

прагнення до досконалості, що, можливо, і не буде досягнуто. За характером шуканого рішення оптимізаційної задачі поділяють на задачі пошуку безумовного або умовного екстремуму цільової функції. Рішенням задачі про безумовний екстремум функції однієї або декількох змінних є деякий вектор, на складові якого не накладено ніяких обмежень.

Доцільність застосування тих або інших способів буріння і їх різновидів (ударно-обертальне, турбінно-роторне, реактивно-турбінне, з промиванням різними буровими розчинами, різними долотами) визначається з урахуванням геологічних, технічних і економічних чинників. Ці рішення переглядаються у міру вдосконалення технології і техніки буріння (доліт, труб, розчинів) і уточнення умов проводки свердловин. Можливе поєднання декількох способів при проводці різних інтервалів однієї і тієї ж свердловини.

При роторному бурінні обертання долоту передається через колону бурильних труб (порожнистий вал) від ротора, що встановлений на гирло свердловини. Ротор використовується і для утримання на вазі колони бурильних і обсадних труб при їх спуску, підвісці, відгвинчуванні. Тому ротор потрібний і при бурінні забійними двигунами. У останньому випадку на застопорений стіл ротора через колону бурильних труб і ведучу трубу передається і реактивний крутний момент від забійних двигунів.

Привід ротора здійснюється від лебідки через карданний вал або ланцюгову передачу або від індивідуального приводу, що дозволяє в широких межах регулювати частоту обертання (від 20 до 200 хв⁻¹ і більш), а також знижувати навантаження на привід лебідки при підйомі колони з обертанням, зменшувати зношування лебідки і її приводу. При обертанні бурильної колони менше небезпека її прилипання, зависання, прихоплення.

Із зростанням глибини підвищується тиск усебічного стискування, більше проявляється пластичність гірських порід, що вимагає більшої тривалості контакту зубів долота із забоем. Усе це призводить до необхідності зниження частоти обертання з 200-100 хв⁻¹ при бурінні на глибинах 500-2000 м до 60-20

хв⁻¹ при бурінні на великих глибинах.

Роторне буріння з низькими частотами обертання (20-80 хв⁻¹) і великими крутними моментами (150-500 кНм) забезпечує можливість ефективного руйнування майже усіх типів гірських порід осадової товщі при використанні різних лопатевих і алмазних доліт. Ці переваги, а також створення низькообертових доліт з герметизованими опорами, що дають велику проходку (сотні метрів), високоміцних обважених бурильних труб з новим типом різьблення, міцних і довговічних вертлюгів - визначають широке застосування роторного буріння.

Нині частота обертання долота при роторному способі буріння знизилася з 100-500 хв⁻¹ до 60-120 хв⁻¹ (за кордоном практикуються частота 25-40 хв⁻¹). Це пов'язано з тим, що із зменшенням частоти обертання знижуються витрати енергії на обертання колони і її знос, збільшується довговічність бурильних труб і долота, зменшуються вібрації і вірогідність злому труб. Зниження частоти обертання (n), проте, повинне супроводжуватися підвищенням передаваного на долото крутного моменту (M_d).

Роторне буріння можливе при усіх видах бурового розчину, проте вимоги до його змашуючої і протизносною здатності вищі. Аварійність при роторному способі вище - внаслідок більшого вигину і закручування бурильної колони, більшої динамічності і дії знакозмінної напруги.

Цей метод буріння використовує гідравлічні забійні двигуни - турбобури, коли бурильна колона не обертається і на це не витрачається потужність бурової установки, а сприймає реактивний крутний момент від забійного двигуна і служить каналом для подачі гідравлічної енергії на забій, тому знижуються аварійність і знос бурильних труб, проміжних обсадних колон. Обертання долота передається від валу турбіни, що приводиться в рух потоком бурового розчину, тобто при турбінному способі відбувається пряма передачі потужності на забій.

Турбобур розташовується безпосередньо над долотом і є машиною, що

перетворює гідравлічну енергію потоку бурового розчину в механічну енергію, необхідну для обертання долота.

Особливості турбінного буріння полягають в наступному.

1. Покращуються (на відміну від роторного способу) умови роботи бурильної колони, що дозволяє полегшити і здешевити її, застосувати легкосплавні і тонкостінні сталеві бурильні труби.

2. Зростає механічна швидкість проходки внаслідок високої частоти обертання долота, що веде до значного зростання комерційної швидкості, особливо свердловин невеликої і середньої глибини.

3. Можуть використовуватися усі види бурових розчинів (за винятком лише продування повітрям).

4. Полегшується відхилення стовбура свердловини в необхідному напрямі.

Для турбінного буріння характерна взаємозалежність режимних параметрів і зміна одного параметра режиму викликає автоматичну зміну інших, тому не можна задавати одночасно усі параметри режиму буріння. Зазвичай прийнято вказувати тип турбобура, число секцій, тип долота, витрату бурового розчину і осьове навантаження.

Якщо збільшити витрату промивальної рідини, відповідно зростає швидкість обертання. При постійній витраті і осьовому навантаженні - швидкість обертання зростає при підвищенні твердості і крихкості розбурюваної породи і зменшується із зростанням пластичних властивостей.

Для вибору типу турбобура по інтервалах буріння, оцінки доцільності використання гідромоніторних доліт і розрахунку діаметрів встановлюваних в них насадок - зазвичай по інтервалах буріння будують діаграму насос-турбобур-свердловина (НТС). При її побудові в координатах тиск-витрата ($P - Q$) у вибраному масштабі наносять послідовно гідравлічні характеристики бурового насоса, свердловини і турбобура.

Проте чим успішніше руйнується порода механічно, тим більше

досконале має бути очищення забою. Наприклад, при бурінні м'яких порід (до 500 МПа) при потужності на валу турбобура 100 кВт, моменті $M=200$ кНм і гідравлічній потужності в насадках долота 100 кВт (швидкість витікання 80-100 м/с) досягнута швидкість буріння $v_m = 100$ м/год. В цих же умовах при підвищенні потужності на валу турбобура і зниженні швидкості витікання в насадках знизилася б істотно механічна швидкість буріння і значно зменшилися б стійкість опор і проходка на долото. Тому в окремих випадках може бути встановлений і мінімально необхідний перепад тиску в насадках долота (ΔP), тоді на діаграмі НТС безпосередньо, зліва від лінії $\Delta P=0$ - і відкладають цю величину.

5. Автоматизовані системи управління процесом спорудження свердловин

На основі результатів аналізу досліджень, які проводяться в області оптимізації й оптимального керування процесом буріння, можна виділити два напрямки: оптимізацію на стадії проектування будівництва свердловини та оперативну оптимізацію процесу буріння.

Перший напрямок ґрунтується на апріорній інформації про стратиграфічний та літологічний розрізи свердловин і фізико-механічні властивості гірських порід і передбачає вирішення двох завдань. Перше з них полягає у тому, що вибирається і розраховується конструкція свердловин, її профіль, конструкція колони бурильних труб, компоновка низу бурильної колони, глибина спуску і діаметр обсадних труб, висота підйому тампонажного розчину і конструкція вибою свердловини.

Другим завданням є проектування процесів поглиблення і промивки свердловини. На цій стадії визначають спосіб буріння, тип вибійного двигуна, типорозмір і кількість доліт, режим буріння, кількість насосів, параметри бурового розчину, оснастку талевої системи, перелік хімреагентів та інтервали обробки. Результати цієї оптимізації є робочий проект на будівництво

свердловини і геолого-технічний наряд.

Такий напрямок керування процесом буріння свердловин характерний для провідних нафтовидобувних компаній, які приділяють значну увагу оптимізації і моніторингу буріння свердловин на суходолі і на шельфі морів.

Оптимальна система (процес) – це система, для якої вибраним певним чином критерій якості стану або роботи є оптимальним. Критерій оптимізації – деякий показник, що характеризує систему або процес, пов'язаний з параметрами їх стану і управління. Це може бути технологічний показник (продуктивність, якість і ін.), економічний показник (мінімум витрат при заданій продуктивності), або узагальнений показник, що є функцією декількох величин. Цільова функція – залежність критерію оптимізації від параметрів системи або процесу. Таким чином, задачею оптимізації конкретного процесу є пошук екстремуму його цільової функції. Звичайно, треба мати на увазі, що необхідність в оптимізації виникає в тих випадках, коли потрібно вирішувати компромісну задачу поліпшення декількох показників системи, що порізно залежать від її параметрів. У випадку, коли процес «включений» до системи автоматичного регулювання (САР), його оптимізація складається з двох стадій – статичної і динамічної. Статична оптимізація вирішує задачі створення і реалізації оптимального стаціонарного режиму процесу, у випадках, що викликаються зміною зовнішніх умов. Така оптимізація передбачає можливість миттєвого перекладу процесу з одного сталого стану до іншого. Задача може вирішуватися за допомогою механічних оптимізаторів, що застосовують метод «чистого пошуку» (прості типові системи), і за допомогою обчислювальних машин, що використовують математичну модель процесу (складні системи). Застосовуються, також, комбіновані методи. Динамічна оптимізація вирішує задачі створення і реалізації системи оптимального управління процесом по мірі його розвитку. Це метод управління, що забезпечує як підтримку оптимального сталого рівню процесу, так і оптимальний режим переходу в інший стан. На відміну від статичної оптимізації тут функція оптимальності є

функцією часу.

Характерною особливістю методів розрахунку режимних параметрів процесу буріння на стадії проектування спорудження свердловин є те, що процес буріння розглядається як детермінований. Проте, в дійсності він є нелінійним, нестационарним, стохастично-хаотичним і таким, що розвивається в часі. З глибиною змінюються умови буріння (зростають гідростатичний тиск і температура та ін.), фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід. Окрім цього, оскільки інформація про технологічні параметри на вибої свердловин передається через колону бурильних труб, це веде до зниження точності вимірювань і сильної зашумленості результатів вимірювання. Все це викликає значні відхилення дійсних режимів буріння свердловини від проектних, що обумовлює необхідність використання оперативного методу оптимізації процесу буріння.

Ці методи засновані на тому, що відомі тип бурової установки, спосіб буріння, конструкція свердловини, типорозміри доліт та інше бурове обладнання для здійснення технологічного процесу буріння і необхідно лише визначити керувальні дії – осьову силу на долото F , швидкість його обертання n та витрату промивальної рідини Q . Для вирішення цього завдання необхідно отримати математичну модель процесу буріння як об'єкта керування, у структуру якої повинні входити критерій оптимальності, закон руху об'єкта керування разом з граничними умовами та обмеження на керувальні дії. Залежно від повноти врахування змін умов буріння і наявності шумів у каналах вимірювання застосовують математичні моделі процесу буріння двох типів: детерміновані і стохастичні.

Аналіз оперативних методів оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин, описаних у літературі дозволив поділити їх на такі, що ґрунтуються на використанні математичних моделей (так звані модельні методи), і пошукові методи.

Методи знаходження оптимального режиму буріння нафтових і газових

свердловин є дуже складними, що обмежило можливості їх використання на виробництві. Головною причиною такої ситуації є те, що ці методи ґрунтуються в основному на припущенні про лінійність об'єкту. Проте, процес буріння є складним нелінійним динамічним об'єктом, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності і перебуває під впливом зовнішніх завад. Задача керування такими об'єктами є однією з ключових у сучасній теорії керування. У цьому випадку прийнятним математичним апаратом є теорія нейродинаміки, в основі якої лежать методи теорії штучних нейронних мереж, хаосу та фракталів.

Практична реалізація розглянутих методів визначення оптимальних режимів процесу буріння нашкоджуються на певні труднощі, які породжені тим, що інформацію про знос озброєння і опор долота неможливо отримати в процесі буріння свердловини. Це значно ускладнює процедуру визначення параметрів математичної моделі. Тому були запропоновані різні критерії відпрацювання доліт – максимум рейсової швидкості буріння V_p , проходки на долото h , добутків hV_p , hV_c , V_pV_c , $V_k t_b$ (V_c , V_k – середня і кінцева швидкість буріння), а також мінімуму собівартості метра проходки. Отже, ефективність процесу буріння підвищували не тільки за рахунок вибору оптимальних керувальних дій F , n , Q , але й за рахунок вибору часу буріння. Тому задача оперативної оптимізації була поставлена ширше, а сама: на основі вибраного критерію оптимальності і математичної моделі процесу буріння свердловин визначити оптимальні значення осьової сили на долото та швидкості його обертання, добившись при цьому раціонального відпрацювання долота на вибої свердловини.

Поставлена задача розв'язувалась дослідниками двома способами. Перший спосіб ґрунтувався на припущенні, що осьова сила на долото F і швидкість його обертання n є постійними протягом рейсу долота і обмеження на них не враховували. Керувальні дії визначали шляхом розв'язання варіаційної задачі Лагранжа з термінальним критерієм якості (собівартості

метра проходки свердловини), використовуючи емпіричний закон зміни механічної швидкості буріння без врахування обмежень на керувальні дії. У випадку врахування обмежень, що покладені на режимні параметри, суть задачі оптимального керування полягала у визначенні таких керувальних дій, які мінімізують собівартість метра проходки свердловини.

Оскільки практична реалізація цих способів оптимізації залежить від наявності інформації про поточний технічний стан озброєння і опор долота, було запропоновано стан озброєння долота оцінювати опосередковано. Отримана при цьому математична модель дозволяє успішно розв'язувати задачу оптимального керування процесом буріння свердловин як при постійних параметрах режиму буріння, так і при $F = \text{var}$, $n = \text{var}$.

Недоліками розглянутих способів оптимізації керування процесом буріння є використання у них детермінованого підходу і математичних моделей та алгоритмів керування, структури, і коефіцієнти яких визначені апріорі на початку рейсу долота. Проте, оскільки процес буріння нафтових і газових свердловин є нелінійним нестационарним і стохастичним об'єктом, що функціонує за умов не тільки апріорної, але й поточної невизначеності і перебуває під впливом зовнішніх збурень, все це призводить не тільки до зміни параметрів математичної моделі, але й з ростом глибини свердловини свою структуру повинні змінювати і критерії оптимальності.

Усунути недоліки детермінованого підходу запропоновано було шляхом застосування способу адаптації керування, який дає змогу зняти початкову невизначеність параметрів математичної моделі при зміні умов буріння і при дії на режимні параметри, у загальному випадку, нестационарних збурень з невідомими статистичними характеристиками. Такі системи можна поділити на системи прямого і непрямого пошуку.

Однією з перших адаптивних систем прямого пошуку була самоналагоджувальна система регулювання процесу буріння глибоких свердловин електробуром. Було показано, що при певному оптимальному значенні осьової

сили на долото проходка за рейс, яка була прийнята за критерій оптимальності, буде максимальною. Проте, для системи адаптивного керування досягнутий рівень проходки втрачає свою практичну цінність, оскільки вона може бути визначена лише після закінчення буріння. Для оцінки ефективності процесу буріння був запропонований показник, який дістав назву «інтенсивність зносу долота K_i », який є функцією осьової сили на долото і досягає свого мінімального значення тоді, коли проходка за рейс буде максимальною. При переході долота в породи з іншими властивостями мінімуму інтенсивності зносу долота відповідатиме інше значення осьової сили на долото. Вибір і підтримання осьової сили на долото, яка відповідає мінімуму інтенсивності зносу долота, а відповідно і максимуму проходки на долото, забезпечується за допомогою самоналагоджувальної системи.

Завдання регулятора подачі долота РПД формується екстремальним регулятором ЕР так, що забезпечується пошук мінімуму інтенсивності зносу долота K_i . Електричні сигнали від давачів В2, В3, пропорційні поточним значенням проходки долота h і середній механічній швидкості буріння V_c , подаються на формувач показника екстремуму ФПЕ, де відбувається отримання неперервного сигналу, що пропорційний інтенсивності зносу долота. З виходу ФПЕ сигнал надходить на вхід екстремального регулятора ЕР. З метою отримання статичної характеристики $K_i(F)$ з більшою крутизною між ЕР і ФПЕ встановлений загострювач екстремуму ЗЕ. Екстремальний регулятор керує регулятором подачі долота, встановлюючи йому таке завдання, яке відповідає оптимальній силі на долото при неперервних змінах умов буріння Z .

Дослідження цієї системи довели, що при гіперболічному законі зміни механічної швидкості буріння максимум критерію оптимальності $\max:h(t_6)$ досягається лише при бурінні незатупленим долотом, а час буріння t_6 буде обмежений лише стійкістю опор долота. Тобто система є недосконалою для буріння традиційними трьохшаршковими долотами і є ефективною для буріння шаршковими долотами нового покоління.

Другим недоліком розглянутої системи є те, що процес вимірювання показника K_i в силу дискретно-неперервного переміщення верхнього кінця колони бурильних труб породжує випадкову складову з високим значенням дисперсії.

До систем непрямого пошуку слід віднести адаптивну систему керування процесом буріння не глибоких свердловин на кар'єрах, основною метою якої є компенсація основного збурення – зміни фізико-механічних властивостей гірських порід. Припускається, що вектор контрольованих збурень містить лише один компонент, який є невідомою випадковою константою з нормальним законом розподілу.

Окрім цього, приймається, що канали вимірювання і передачі керувальних дій не мають пам'яті і вміщують адитивну суміш сигналів і шуму, які мають нульове математичне сподівання і підпорядковуються нормальному закону розподілу. При таких припущеннях система є системою з повною інформацією і її синтез ґрунтується на класичних методах оптимізації стохастичних систем. Оскільки процес буріння нафтових і газових свердловин є нестационарним, то запропоновано розбивати породи на такі інтервали, у середині яких виконується умова стаціонарності випадкових процесів. Недоліком цього підходу є відсутність методики розбиття порід на однорідні інтервали, а також необхідність визначення статистичних характеристик (оцінок математичного сподівання дисперсії, автокореляційних функцій) випадкових процесів безпосередньо у процесі буріння, оскільки вони змінюються від рейсу до рейсу, від свердловини до свердловини.

6. Методи математичної статистики і планування експерименту при пошуку оптимальних умов

Експериментальні дослідження є основним джерелом отримання достовірних відомостей про об'єкти реального світу. Такі дослідження проводяться з метою вибору раціональних технологічних режимів

функціонування або оптимізації параметрів систем, оцінки міри виконання технічних вимог до створюваних виробів, з'ясування закономірностей функціонування, аналізу впливу чинників на показники якості систем тощо. Натурні дослідження властивостей технічних засобів або складних моделей вимагають значних витрат ресурсів, що примушує приділяти серйозну увагу раціональній організації експериментального вивчення об'єктів.

Не є виключенням і буровий процес, що відрізняється складним впливом безлічі чинників на кінцевий результат, наприклад, механічну швидкість буріння або витрати потужності на буріння.

Планування експерименту - процедура вибору числа і умов проведення досліджень, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю.

При реалізації методів планування експерименту істотні наступні обставини

- прагнення до мінімізації загального числа досліджень;
- одночасне варіювання усіма змінними, що визначають процес, за спеціальними правилами - алгоритмами;
- використання математичного апарату, що формалізує багато дій експериментатора;
- вибір чіткої стратегії, що дозволяє приймати обгрунтовані рішення після кожної серії експериментів.

Планування експерименту починають з вибору об'єкту дослідження, який вивчається з певною метою. Для проведення експерименту необхідно мати можливість для дії на поведінку об'єкту управління, з метою отримання результату або відгуку об'єкту управління на обставини дії. Усі обставини такої дії прийнято називати чинниками. Параметри оптимізації - чисельні характеристики цілей дослідження.

Чинники експерименту можуть бути якісними і кількісними. Якісні чинники, як правило, квантифікують - надають їм числові позначення, тим самим переводячи їх в кількісні значення.

Експериментальні дані формуються шляхом або пасивного спостереження, або за допомогою активного експерименту - цілеспрямованої дії на об'єкт дослідження з метою отримання достовірної інформації. При пасивному спостереженні інформація виходить шляхом реєстрації необхідних відомостей в умовах звичайного функціонування об'єкту.

Активний експеримент дозволяє розширити область дослідження, точніше розкрити закономірності функціонування, скоротити потреби в

ресурсах на проведення дослідження. Але організація і постановка активного експерименту складніше пасивного. Крім того, слід враховувати і принципові обмеження в проведенні активних експериментів на діючих об'єктах, неможливість їх здійснення для недоступних об'єктів.

Нині теорія планування експерименту є самостійним науковим напрямом і знаходить практичне застосування там, де проводяться складні наукові і технічні експериментальні дослідження. Теорія використовує апарат математичної статистики, лінійної алгебри, комбінаторики і інших розділів математики.

Методи планування експериментів, оптимізації і прогнозування набувають усього більшого значення при постановці досліджень, спрямованих на вивчення складних бурових процесів. Планування експериментів передбачає включення в практику інженерних досліджень способів, що дозволяють збільшувати ефективність робіт. Багато методів, розроблених стосовно планування експериментів, сприяють ухваленню оптимальних рішень на різних стадіях дослідницької роботи. Вони виявляються ефективними і при прогнозуванні показників, що характеризують ефективність розвідувального буріння.

Пошук оптимальних умов є одним з найбільш поширених науково-технічних завдань. Вони виникають у той момент, коли встановлена можливість проведення процесу і необхідно знайти найкращі (оптимальні) умови його реалізації.

Вивчення властивостей гірських порід, прогнозування, проектування майбутніх зразків нової бурової техніки, розробка нових пристроїв управління, порівняльні випробування породоруйнівного інструменту і рішення різноманітних технологічних завдань буріння вимагають широкого проведення експериментальних досліджень. Математичні методи планування експериментів - засоби раціональної організації дослідницьких робіт, скорочення витрат і засобів їх проведення. При цьому дослідник активно втручається в експеримент, не чекаючи його закінчення, може в ході експерименту змінити його напрям або переформулювати завдання.

Експерименти, як правило, є багатофакторними і пов'язані з оптимізацією якості матеріалів, відшукуванням оптимальних умов проведення технологічних процесів, розробкою найбільш раціональних конструкцій устаткування тощо. Системи, які служать об'єктом таких досліджень, дуже часто є такими складними, що не піддаються теоретичному вивченню в певні терміни. Тому, незважаючи на значний об'єм виконаних науково-дослідних робіт, через

відсутність реальної можливості досить повно вивчити значне число об'єктів дослідження, як наслідок, багато рішень приймаються на підставі інформації, що має випадковий характер, і тому далекі від оптимальних.

Застосування планування експерименту робить поведінку експериментатора більш цілеспрямованою і організованою, істотно сприяє підвищенню продуктивності праці і надійності отриманих результатів. Важливою перевагою є його універсальність, придатність у величезній більшості областей досліджень.

7. Аналіз методів моделювання та ідентифікації технологічних процесів спорудження свердловин різного призначення

Найбільш важливою характеристикою процесу взаємодії долота з гірською породою є залежність механічної швидкості буріння від осьової сили на долото і частоти обертання долота.

Питання автоматизації процесів керування бурінням нафтових і газових свердловин приводять до необхідності вивчення цих складних характеристик технологічного процесу буріння, який здійснюється за умов невизначеності під впливом стохастично-хаотичних збурень. Тому й моделям процесу буріння притаманна невизначеність, зумовлена, з одного боку, відсутністю точного опису процесів функціонування систем, а з іншого боку – неспроможністю оцінити стан систем абсолютно точно, що ускладнює й унеможлиблює використання точних кількісних методів. Дійсно, скористатися математичними моделями, які розкривають основні закономірності впливу різних технологічних факторів на механічну швидкість буріння, не представляється можливим без проведення експериментального буріння з метою визначення конкретних цифрових значень коефіцієнтів моделі. Це викликано тим, що результати промислового буріння, які відображають сукупний вплив різних технологічних факторів на проходку одного долота і механічну швидкість, не дозволяють побудувати графіки залежностей механічної швидкості буріння від осьової сили на долото і частоти його обертання та визначити параметри моделі, які потрібні для корегування і оптимізації режимів буріння. Тому, аналіз взаємозв'язків параметрів математичної моделі процесу буріння свердловин є важливим науковим та практичним завданням, яке дозволить синтезувати кібернетичну математичну модель. Синтез адекватних математичних моделей процесу буріння свердловин є актуальною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням у галузі цифрових керуючих

обчислювальних комплексів і нового типу доліт, які мають проходку декілька тисяч метрів на одне долото.

Невирішеною частиною загальної проблеми ідентифікації параметрів математичної моделі процесу буріння є встановлення взаємозв'язків параметрів математичної моделі технологічного процесу буріння нафтових і газових свердловин для ефективного і швидкого визначення збурень, що впливають на об'єкт керування.

У зв'язку з вище наведеним, проаналізуємо взаємозв'язки параметрів математичної моделі технологічного процесу буріння свердловин для ефективного і швидкого розв'язання задачі ідентифікації стохастично-хаотичних збурень, що впливають на об'єкт керування в процесі роботи долота на вибої свердловини.

Відомо, що процес формалізації процесу буріння свердловин має ряд специфічних особливостей, що дає підстави говорити про специфічну методологію його досліджень. До числа специфічних ознак слід віднести невідтворюваність, нестационарність, стохастичність процесу, його багатofакторність. Крім того, процес буріння є таким, що розвивається в часі. Все це викликає погану організацію внутрішньої структури об'єкта в розумінні нечіткого проявлення причино-наслідкових відношень. Проте, процес буріння як об'єкт керування повинен бути формалізований у вигляді багатовимірної системи однонаправленого перетворення вхідних координат (керуючих впливів) U , вхідних контрольованих і неконтрольованих збурень f у реакції об'єкта X .

При заданій геолого-технічним нарядом конструкції колони на кожному з інтервалів, компоновці низу бурильної колони і вибраному типорозміру долота керуючими впливами, які визначають режим буріння, є осьова сила F на долото, частота його обертання n , продуктивність насосів Q і тиск бурового розчину на стояку. До збурень, які впливають на процес слід віднести фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, градієнт пластового тиску, тертя колони в свердловині, можливі ускладнення при бурінні (осипи і обвали, заклинювання, зтяжки, каверно-жолобо-утворення, поглинання бурового розчину, звуження стовбура).

Усі математичні моделі, що розроблялись, можна поділити на статичні і динамічні. Останні розроблялись з врахуванням динаміки зношення озброєння бурових доліт.

Конструкція доліт типу PDC забезпечує тривалий ресурс експлуатації і високі швидкості буріння за рахунок високої зносостійкості ріжучих елементів

PDC-різців та відсутності підшипникової опори, що підвищує проходку долота і суттєво зменшує кількість спуско-підймальних операцій. Незначний вплив динаміки роботи долота на вибій і бурильну колону порівняно з шарошковими та висока зносостійкість різців колібруючої поверхні долота виключають необхідність проробки і калібрування стовбура свердловини перед спуском обсадної колони. Відсутність рухомих елементів в конструкції доліт виключає аварійні ситуації, які пов'язані з ними.

8. Удосконалення моделей технологічного процесу спорудження свердловин різного призначення для задач оптимізації керування

Особливістю технологічних процесів нафтогазової галузі промисловості як об'єктів керування є те, що багато з них є погано визначеними нелінійними динамічними стохастично-хаотичними об'єктами, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури та параметрів і перебувають під впливом зовнішніх завад. Для управління ними методи класичної теорії автоматичного керування і теорії адаптивних систем найчастіше виявляються неефективними, оскільки ґрунтуються головним чином на припущенні про лінійність об'єкта. Крім того, визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів таких систем суттєво ускладнено за відсутністю повної інформації про діючі на об'єкт параметричні і координатні збурення та складністю аналітичного розв'язку задачі параметричного синтезу.

У зв'язку з цим для розв'язання задач автоматичного керування погано визначеними нелінійними об'єктами все більш широке застосування знаходять методи, що ґрунтуються на апараті обчислювального інтелекту: нечітка логіка, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, тощо.

Проте, як показує аналіз, наявні результати мають локальний характер. Проблема стосовно автоматизації процесів керування поглибленням свердловин ускладнюється ще й тим, що характер нелінійності об'єкта змінюється з часом і з глибиною свердловин. Збурення також мають нетрадиційний стохастичний характер з наявністю хаотичних і квазі-періодичних сигналів. У цьому випадку прийнятним математичним апаратом є нечітка логіка.

Характерною особливістю процесу поглиблення свердловин є те, що на теперішній час відсутні серійні прилади для вимірювання режимних параметрів безпосередньо на вибої свердловини (що значною мірою і зумовлює

унікальність процесу поглиблення свердловин). Це призводить до необхідності використовувати природні канали зв'язку (колону бурильних труб, стовп промивальної рідини) і оцінювати режимні параметри за показами наземних приладів. Дослідження, проведені вітчизняними і зарубіжними авторами, засвідчили, що природні канали зв'язку у свердловині породжують адитивні шуми, які в загальному випадку є нестационарними.

Записавши осьову силу F на бурове долото, можна виявити нестационарність випадкового процесу $F(t)$ за математичним сподіванням, дисперсією і інтервалом кореляції як за глибиною свердловини, так і в межах одного довбання. Проте, завжди є можливість виявити такі ділянки запису осьової сили на долото, де функція $F(t)$ є стаціонарним випадковим процесом, який володіє властивостями ергодичності. При ручній подачі долота дисперсія $F(t)$ може досягати значень порядку 39 кН^2 , а при автоматичній подачі – порядку $4,5 \text{ кН}^2$.

Аналіз записів швидкості обертання долота $n_d(t)$ на діаграмній стрічці доводить, що при роторному бурінні і бурінні електробурами величина швидкості обертання долота має незначну дисперсію, і її значення зумовлене переважно похибками вимірювання і зміною умов роботи долота на вибої свердловини, а також тертям колони об стінки свердловини (для роторного буріння).

Синтез оптимальних систем керування технологічними процесами в нафтогазовидобувній промисловості є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням на об'єктах галузі систем автоматизації процесів керування і комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Детерміновані і стохастичні методи, які застосовуються для їх автоматизації, не дають належного результату, тому виникає необхідність пошуку нових сучасних методів автоматизації, інтелектуальних технологій управління на базі штучних нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів, тощо.

9. Структури системи оптимального автоматичного керування технологічними процесами поглиблення свердловин

Визначення функції роботи бурового долота як динамічної ланки автоматичної системи керування процесом поглиблення нафтових і газових свердловин, є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з створенням останнім часом глибинних пристроїв контролю швидкості обертання доліт і, як

наслідок, замкнених систем автоматичного регулювання, в яких долото є елементом цих систем. При цьому слід врахувати, що ефективність процесу буріння свердловин залежить від енергії, яка підводиться до бурового долота.

Проте, аналіз показує недостатній об'єм проведених досліджень в напрямку визначення статичних і динамічних властивостей бурових доліт як елементів систем оптимального автоматичного керування.

Скористаємось очевидним твердженням, що енергія W_3 , яка підводиться із зовні до бурового долота, дорівнює сумі витрат енергії на руйнування гірської породи на вибої свердловини W_1 , на просування бурильного інструменту W_2 і тепло W_T за рахунок сил тертя при розтиранні породи, тобто:

$$W_3 = W_1 + W_2 + W_T.$$

Що стосується потужності N , яка витрачається на поглиблення вибою свердловини, то вона дорівнює сумі двох потужностей: N_1 – потужності, яка витрачається на обертання долота; N_2 – потужності, яка витрачається на поглиблення вибою свердловини. Частка потужності N_1 в залежності від конструкції долота і його технічного стану, а також фізико-механічних і абразивних властивостей гірської породи, витрачається на подолання сил тертя і перетирання сколотих шматків породи, якщо вони не відразу були винесені із свердловини, або потрапили знов в зону дії долота. Ця частка енергії перетворюється в тепло, а решта витрачається на механічну роботу на руйнування гірської породи на вибої свердловини.

При бурінні гірських порід з різними фізико-механічними і абразивними властивостями долотами різних типорозмірів при різних, але постійних під час експерименту параметрах режимів буріння, механічна швидкість буріння $V(t)$ у більшості випадків зменшується внаслідок зношування фрезерованого оснащення доліт за гіперболічним законом.

При бурінні долотами з твердосплавним і алмазним оснащенням і постійних параметрах режиму механічна швидкість буріння практично не змінюється в часі, оскільки абразивне зношення твердосплавних зубців і алмазів незначне. Зміни механічної швидкості буріння спостерігались тільки тоді, коли починалось викришування або випадання зубців, що приводить до зниження породоруйнівної властивості оснащення долота.

Отже, з урахуванням прийнятих припущень алгоритмічну структуру бурового долота як динамічної ланки системи автоматичного регулювання параметрів режиму буріння, можна представити у вигляді послідовно з'єднаних нелінійного елемента і ідеальної інтегруючої ланки, тобто у вигляді нечіткої системи Гаммерштейна. Це дозволяє використати передавальну функцію

бурового долота як елемент системи автоматичного контролю і керування процесом поглиблення нафтових і газових свердловин.

Аналіз похибок вимірювання проходки є актуальною науково-прикладною задачею у зв'язку з тим, що інформація про проходку долота і про усереднене значення механічної швидкості проходки, яка визначається за величиною подачі бурильного інструменту, широко використовується при управлінні процесом буріння нафтових і газових свердловин, а також розрахунках техніко-економічних показників процесу. Після опрацювання інформації про подачу бурильного інструменту можуть бути отримані такі показники ефективності процесу заглиблення свердловини, як проходка на долото; рейсова швидкість буріння; проходка за певний інтервал часу; час або енергія, що витрачається на проходку певної величини; собівартість метра проходки; проходка за вахту (за добу, за місяць, за рік) та ін. Перераховані показники є інтегральними величинами, які отримують вимірюванням подачі бурильного інструменту або часу, що витрачається на проходку певної величини. При визначенні проходки як інтегральної величини вдається значно знизити вплив різного типу завад, які сильно викривляють інформацію про миттєві значення механічної швидкості буріння. Ці завади пов'язані з тертям колони бурильних труб до стінки свердловини, нерівномірністю подачі бурильного інструменту, вібраціями, деформацією елементів спуско-підіймального механізму, деформацією бурильної колони тощо. Головними джерелами похибок вимірювання проходки є деформація колони бурильних труб і елементів спуско-підіймального механізму.

Подальший розвиток отримав метод аналізу впливу деформації колони бурильних труб на абсолютну похибку вимірювання проходки долота в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин, що на відміну від існуючих методів, які не враховують вплив температури на похибку вимірювання, дає змогу враховувати реальні залежності деформації колони бурильних труб від температури, які спостерігаються при бурінні свердловини, що підвищує достовірність і точність отриманих результатів вимірювання проходки. Отримані результати можуть бути рекомендовані для розрахунків похибок вимірювання проходки долота на базі переміщення верхнього кінця колони бурильних труб з урахуванням коливань температури в регіоні. При проектуванні пристроїв, що контролюють проходку долота, слід здійснювати корекцію температурної похибки.

Ідентифікація хаотичної поведінки об'єктів керування, що функціонують за умов апріорної та поточної невизначеності щодо їхньої структури та

параметрів, є важливим науково-прикладним завданням для нафтогазовидобувної галузі промисловості, зокрема для керування процесом буріння свердловин і розробки нафтових і газових родовищ. Це обумовлено тим, що ці об'єкти керування відносяться до класу погано визначених об'єктів, що розвиваються в часі і мають нелінійні статичні та динамічні характеристики.

Геологічні розрізи площ, що розбурюються, характеризуються високою неоднорідністю. Окрім цього, в окремих стратегічних підрозділах і складках пластові тиски змінюються від аномально низьких до аномально високих, що вимагає застосування бурових розчинів різної густини.

Великі кути падіння пластів (від $5^{\circ} \div 8^{\circ}$ до $70^{\circ} \div 90^{\circ}$), суттєві тектонічні порушення сприяють інтенсивному викривленню свердловини. Найбільше відхилення вибою свердловини від гирла свердловини досягає 300-350 м. Висока абразивність і міцність гірських порід є однією із причин викривлення стовбурів свердловин і відхилення їх вибоїв від заданих координат. Окрім цього, коливання колони бурильних труб викликані роботою долота, переходом його із однієї породи в іншу, прихопленнями колони бурильних труб сприяють тому, що колона бурильних труб працює, головним чином, у динамічному режимі. Це може викликати різкі і часто небезпечні коливання частоти обертання і крутного моменту, які створюють у даній системі аварійні ситуації – поломку колони бурильних труб та вихід з ладу усєї бурової установки.

Динамічну стійкість поглиблення свердловин поряд з включенням в компоновку низу бурильної колони наддолотного бурового амортизатора, можна забезпечити регулюванням параметрів режиму буріння, зокрема, осьового навантаження F на долото. Цьому питанню приділяється достатньо уваги у вітчизняній і зарубіжній технічній літературі. Запропоновано багато моделей вибору осьового навантаження на долото. Проте, враховуючи складність об'єкта керування, а також те, що осьове навантаження передається на вибій свердловини не повністю, оскільки частка навантаження втрачається на подолання сил опору, запропоновано моделі цього процесу розглядати як феноменологічні моделі, що створені на основі холістичного підходу. Це дає змогу збільшити глибину прогнозів у цій галузі знань.

Факторами, які обмежують процес буріння можуть слугувати особливості фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід, глибина залягання, аномальні пластові тиску, поглинання бурового розчину та ін.

Вибір конкретного типу інформаційної моделі повинен ґрунтуватись на апріорних даних про свердловини, які побудовані на даному родовищі. Запропонована методика дозволяє на основі даних системи контролю і

управління процесом буріння свердловин оперативно уточнювати значення параметрів моделі по мірі поглиблення свердловини і визначити величину осьового навантаження на долото. Це дасть змогу забезпечити стійкий динамічний режим поглиблення свердловин.

10. Динамічна стійкість, геологічна інформативність та експлуатаційна ефективність процесу поглиблення свердловин

Ефективність руйнування гірських порід при проводці свердловини залежить від комплексу чинників: осьового навантаження на долото (G), частоти обертання долота (ω), витрати Q і параметрів бурового розчину (ρ , T), типу долота, геологічних умов, механічних властивостей гірських порід. Виділяють керовані параметри режиму буріння (G , ω , Q , ρ , T), які можна змінювати з пульта бурильника в процесі роботи долота на забої, і чинники, які неможливо оперативно змінювати. Певне поєднання їх, при якому здійснюється механічне буріння свердловини, і називається режимом буріння. При бурінні гідромоніторними долотами на показники роботи великий вплив чинить енергія струменів з насадок долота, яка є функцією швидкості витікання і діаметру струменя.

Режим буріння, що забезпечує отримання найкращих техніко-економічних показників (за даних умов буріння), називається оптимальним. Іноді в процесі буріння доводиться вирішувати і спеціальні завдання, наприклад - проводка свердловини через поглинаючі пласти, забезпечення мінімального викривлення свердловини, максимального виходу керна, якісного розтину продуктивних пластів. Режими буріння, при яких вирішуються такі завдання, називаються спеціальними.

Кожен параметр режиму буріння впливає на ефективність руйнування гірських порід, причому вплив одного параметра залежить від рівня іншого.

Поєднання параметрів яке забезпечує досягнення найкращих показників роботи цього долота, за допомогою цієї бурової установки називають оптимальним режимом буріння. Режим буріння називають швидкісним, якщо на цьому етапі досягнуті найвищі показники роботи доліт і використані потужніша бурова установка і досконаліші технічні засоби в порівнянні з тими, які застосовуються для масового буріння свердловин на цій площі.

Якщо поєднання параметрів вибирають не для отримання високих показників роботи долота, а з метою запобігання викривленню свердловини, примусового викривлення її із заданою інтенсивністю в потрібному напрямі,

поліпшення ефективності відбору керна і т.і., - то режим буріння називають спеціальним.

Список літературних джерел

1. Білецький В.С. Основи нафтогазової справи / В.С. Білецький, В.М. Орловський, В. І. Дмитренко, А.М. Похилко. – Полтава: ПолтНТУ, К.: ФОП Халіков Р.Х., 2017. – 312 с.

2. Буріння свердловин. Навчальний посібник. Є.А. Коровяка, В.Л. Хоменко, Ю.Л. Винников, М.О. Харченко, В.О. Расцветаєв ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т "Дніпровська політехніка". – Дніпро: НТУ "ДП", 2021. - 294 с.

3. Моделювання та ідентифікація процесу буріння для задач оптимізації управління: монографія / Г.Н. Семенцов, О.В. Гутак – Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2014 – 295 с.

4. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г. Технологія розробки нафтових родовищ. [Текст]: навч. посіб. для студ спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / В. М. Орловський, В. С. Білецький, В. Г. Вітрик; ХНУМГ ім. О. М. Бекетова; НТУ «ХП». - Полтава: ТОВ "Фірма «Техсервіс», 2020. – 243 с.

5. Орловський В. М., Білецький В. С., Вітрик В. Г., Сіренко В. І. Бурове і технологічне обладнання. Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, НТУ «ХП», ТОВ НТП «Бурова техніка», Львів, Видавництво «Новий Світ -2000», 2021. – 358 с.

6. Основи нафтогазової справи : підручник / Судаков А.К., Коровяка Є.А., Максимович О.В., Расцветаєв В.О., Дзюбик А.Р., Калюжна Т.М., Войтович А.А., Яворська В.В. ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Львів : Сполом, 2023. – 596 с.

7. Прогресивні технології спорудження свердловин: монографія. / Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: 2020. – 164 с.

8. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник / О.І. Огірко, Н.В. Галайко. – Львів: ЛьвДУВС, 2017. – 292 с.