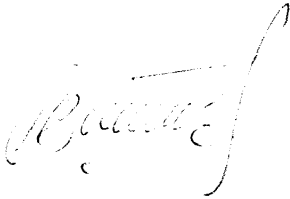


**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

На правах рукопису

САБАТ Наталія Василівна



УДК: 681.513.6:622.243

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД
В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ
СВЕРДЛОВИН**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Семенцов Георгій Никифорович

доктор технічних наук,

професор

Івано-Франківськ – 2011

d 390



ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	
	12
1.1. Характеристика об'єкта ідентифікації і контролю.....	12
1.2. Аналіз методів та засобів контролю буримості гірських порід.....	19
1.2.1. Методи сигнальної ідентифікації буримості гірських порід.....	21
1.2.2. Засоби контролю фізико-механічних властивостей гірських порід контактним методом.....	28
1.2.3. Аналіз засобів безконтактного контролю буримості гірських порід	32
1.3. Аналіз проблем, які виникають при розробці методів безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід і вибір методу.....	39
1.4. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень.....	40
РОЗДІЛ 2	
РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	
	44
2.1. Методики оцінки буримості гірських порід.....	44
2.2. Моделювання розподілу розрізу свердловини на ділянки (пачки) однорідних за буримістю інтервалів порід.....	51
2.3. Вимоги до математичної моделі буримості гірських порід з позицій автоматизованого контролю.....	54
2.4. Розроблення структури моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта контролю буримості гірських порід.....	62

2.5. Розроблення узагальненої математичної моделі буримості гірських порід в просторі станів.....	64
2.6. Розроблення динамічної інформаційної моделі буримості гірських порід в умовах дрейфу.....	73
2.7. Розроблення методики визначення базової механічної швидкості буріння	82
Висновки до другого розділу.....	84

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ І РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ.....	86
3.1. Ідентифікація параметрів математичної моделі механічної швидкості буріння.....	86
3.2. Методика розбивки інтервалу буріння на пачки гірської породи.....	95
3.3. Розбиття гірської породи на класи за буримістю на засадах штучних нейронних мереж.....	105
3.4. Вибір частоти дискретного контролю буримості гірських порід.....	113
3.5. Прогнозування швидкості буріння на основі штучних нейронних мереж.....	115
3.6. Вірогідність визначення меж залягання гірських порід різної буримості.....	122
Висновки до третього розділу	130

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА БЕЗКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН.....	132
4.1. Розроблення структурної схеми системи автоматизованого контролю буримості гірських порід в умовах перешкод з урахуванням	

	4
похибки давача.....	132
4.2. Удосконалення системи контролю і управління процесом буріння «Геобох» для діагностування буримості порід і стану долота.....	138
4.3. Розроблення структурної схеми системи підтримки прийняття рішень для управління процесом буріння свердловин в умовах невизначеності.....	142
4.4. Архітектура системи кластерного аналізу буримості гірських порід на базі автоматизованого безконтактного контролю в реальному часі.....	146
Висновки до четвертого розділу.....	149
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	151
ДОДАТКИ	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	186

умовах неповної інформації, нестационарності та невизначеності процесу поглиблення свердловини у теперішній час набуває важливого значення. У зв'язку з цим досить актуальною є задача розробки ефективного безконтактного методу ідентифікації буримості гірських порід в реальному часі і програмно-технічних засобів, здатних функціонувати в складі адаптивної системи керування за умов апріорної та поточної невизначеності відносно структури і параметрів об'єкта керування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок наукових досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Дисертаційна робота виконана у відповідності з основним науковим напрямком діяльності кафедри автоматизації технологічних процесів та моніторингу в екології ІФНТУНГ. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних робіт із розвитку нафтогазового комплексу України та базується на результатах держбюджетних тем Д4-01-Ф “Наукові основи контролю, управління і екологічного моніторингу об'єктами нафтогазового комплексу України” (ДР № 0101U001664), “Автоматизоване управління технологічними процесами буріння, видобування, транспортування, зберігання і переробки нафти і газу” (затв. Науковою радою ІФНТУНГ 04.10.2004., пр. №8).

В межах вказаних тем здобувач була безпосереднім виконавцем розділів робіт із розроблення методів і засобів ідентифікації буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробленні методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових.

Досягнення вказаної мети забезпечується в дисертаційній роботі шляхом розв'язання таких взаємозв'язаних задач:

- аналіз сучасних методів і систем ідентифікації та контролю буримості гірських порід;

- проведення досліджень взаємозв'язків основних факторів, що визначають буримість гірської породи, та обґрунтування найбільш інформативного параметру для оцінювання буримості порід в реальному часі;

- розробка математичної моделі буримості гірських порід, динамічної інформаційної моделі і методу визначення базових значень показника буримості;

- встановлення зв'язків систематичної і випадкової похибок контролю з показником буримості гірських порід, призначеним для оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин;

- вибір оптимальної частоти дискретного контролю відхилень показника буримості гірських порід за межі порогового значення, яка забезпечує визначення меж залягання гірських порід різної буримості згідно заданого критерію вірогідності контролю;

- розробка та дослідження автоматизованої системи безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин

Об'єктом дослідження є технологічний процес поглиблення нафтових і газових свердловин роторним способом.

Предметом дослідження є методи ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин.

Методи дослідження: аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду, систематизація існуючих методів і підходів до контролю буримості гірських порід під час поглиблення нафтових і газових свердловин, для обґрунтування актуальності, мети і задачі дослідження; методи ідентифікації, що дозволили удосконалити математичну модель буримості; теорія планування і оброблення результатів експериментів для визначення взаємозв'язків параметрів і показників процесу буріння з показниками буримості; аналіз, що дозволив виявити властивості аналізованих функцій; математична статистика, що дозволила дослідити результати експериментів; імітаційне моделювання для

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АСКТ	– автоматизована система керування технологічним процесом;
БЗ	– база знань;
БД	– база даних;
ГТД	– геолого-технологічні дослідження;
ГТН	– геолого-технологічний наряд;
ДП	– давач проходки долота;
ДС	– давач сили;
ДЧ	– давач швидкості обертання долота;
ІС	– інформаційна система;
КО	– контрольований об'єкт;
КПТЗ	– комплекс програмно-технічних засобів;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ППЗ	– прикладне програмне забезпечення;
ПЛК	– програмований логічний контролер;
PDC	– безопорне полікристалеве алмазне долото (Polycrystalle Diamand Cutter);
ПТК	– програмно-технічний комплекс;
СКУБ	– система контролю і управління процесом буріння;
УБР	– управління бурових робіт;
ШНМ	– штучна нейронна мережа.

ВСТУП

Актуальність теми. Подальший розвиток нафтової і газової промисловості характеризується зростанням обсягів пошуково-розвідувального буріння свердловин в 6 разів порівняно з 2004 р., як це передбачено «Енергетичною стратегією України до 2030 року та подальшу перспективу». За таких умов до 2030 р.р. можливо приростити розвідані запаси нафти в обсязі до 150 млн.т. При цьому спостерігається тенденція збільшення глибин свердловин, буріння яких ведеться, головним чином, роторним способом. Для буріння нафтових і газових свердловин використовується нове покоління трьохшаршкових доліт, які забезпечують проходку на одне долото до 2000 м, а також алмазні долота з проходкою до 6000 м. В результаті одним долотом розбурюються декілька різнорідних шарів порід, буримість яких треба знати, щоб уточнити параметри математичної моделі і визначити оптимальні керувальні дії для наступного інтервалу буріння. Проте аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, показав, що відомі методи контролю буримості гірських порід як координатного збурення не відповідають сучасному рівню автоматизації та інформаційної забезпеченості бурових підприємств нафтогазовидобувної галузі. Вони мають істотні обмеження, серед яких неможливість отримання інформації для автоматичної системи керування про головне координатне збурення в реальному часі.

Це обумовлено тим, що технологічний процес поглиблення свердловини є нелінійним стохастично-хаотичним процесом, який здійснюється за умов апріорної та поточної невизначеності, розвивається в часі і перебуває під впливом різного типу адитивних і мультиплікативних завад. Головними збурювальними впливами, що діють на керований об'єкт, є фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, зокрема такий комплексний чинник як буримість гірських порід. Контактними методами цей показник визначити не представляється можливим. Тому ідентифікація буримості гірських порід в

підтвердження вірогідності отриманих теоретичних результатів; методи схеми і системотехнічні для розроблення технічних засобів.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним:

вперше:

- запропоновано теоретичні засади методу ідентифікації та безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин, що дає змогу виділяти в свердловин інтервали однакової буримості і визначити координатні збурення, що діють на систему адаптивного оптимального керування;

- на базі аналізу розподілу показника буримості і похибок вимірювання визначено ймовірність хибної тривоги, ймовірність невизначеної відмови та вірогідність контролю, що дало змогу обґрунтувати спосіб визначення порогового значення буримості гірських порід для системи автоматизованого контролю; як ознаку зміни буримості використано спостереження за рівнем механічної швидкості буріння;

- встановлено функціональні зв'язки систематичної і випадкової похибок контролю із запропонованим показником буримості гірських порід, що дозволило використати їх для роз'язання задач оптимізації керування процесом буріння нафтових і газових свердловин;

- запропоновано структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення пристрою для автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід, що дає змогу інтегрувати його в існуючу систему керування процесом буріння СКУБ-М2.

Удосконалено метод вибору оптимальної частоти дискретного контролю відхилень показника буримості гірських порід за межі порогового значення, який, на відміну від існуючих, забезпечує визначення меж залягання гірських порід різної буримості згідно заданого критерію вірогідності контролю.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблений метод ідентифікації буримості гірських порід, на відміну від

існуючих дозволяє оперативно контролювати буримість гірських порід незалежно від типорозмірів породоруйнівного інструменту та геолого-технологічних умов і вносити корективи в керувальні дії процесу буріння (осьова сила на долото та частота його обертання).

Запропоновані методи ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід прийняті до впровадження на бурових підприємствах ВАТ «Нафтогаз України» (Акт від 21.10.2008р.); на підприємстві ТОВ «Спеціальне конструкторське бюро засобів автоматизації», СКБ ЗА, м.Івано-Франківськ, (Акт від 08.10.2008р.); впроваджені в навчальний процес кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології ІФНТУНГ (Акт від 7.10.2008р.) для студентів спеціальності 7.092501 – автоматизоване управління технологічними процесами в дисциплінах «Спеціальні вимірювальні прилади і системи», «Автоматизація технологічних об'єктів нафтогазової промисловості».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У роботах, написаних у співавторстві дисертанту належать: у роботі [125] – безконтактний метод контролю буримості гірських порід; [53] – можливість використання безконтактного методу контролю буримості гірських порід при бурінні горизонтальних і похило спрямованих свердловин; [48] – алгоритм визначення буримості гірських порід на основі параметрів і показників процесу буріння; [47] – структура автоматизованої системи контролю буримості гірських порід; [101] – удосконалена структура системи «Geo Vox»; [105] – структура системи прийняття рішень в умовах невизначеності; [46] – вимоги до математичної моделі буримості; [126] – метод автоматизованого визначення буримості; [127] – безконтактний метод оцінювання буримості; [129] – вірогідність контролю буримості; [123] – вплив витрати промивного агента на буримість; [101] – удосконалена структура системи «Geo Vox»; [134] – автоматизована система контролю буримості; [79] – стратегія ідентифікація

буримості; [57] – визначення ймовірності переходу долотом межі пластів; [129] – спосіб оцінювання поточних значень буримості.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і одержали позитивну оцінку на: 3-ій міжнародній науково-практичній конференції “Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів”(Хмельницький 2004р.); 22-гої міжнародної міжвузівської школі-семінарі “Методи і засоби технічної діагностики” (Івано-Франківськ 2005 р.); 4-ій науково-технічній конференції і виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (Івано-Франківськ 2005); міжнародній науково-технічній конференції “Інтегровані системи управління в гірничо-металургійному комплексі” (Кривий Ріг 2006); міжнародній науково-технічній конференції “Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці “ІФНТУНГ-40”” (Івано-Франківськ 2007); п’ятій всеукраїнській науково-технічній конференції “Вимірювання витрати та кількості газу» (Івано-Франківськ 2007); міжнародній науково-практичній конференції «Научные исследования и их практическое применение». Современное состояние и пути развития 2007» (Одеса 2007); VII міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування-2008: стан і перспективи» (Київ 2008).

Публікації. Основні результати дисертації викладені у 23 публікаціях, у тому числі - 6 у виданнях, що входять до переліків ВАК України, 5 – у зарубіжних та інших виданнях та у 12 публікаціях у збірниках праць Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференцій (серед яких 8 - без співавторів).

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Обсяг дисертації - 201 сторінки. Дисертація містить 57 рисунків, 14 таблиць і 134 посилань на літературні джерела.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

1.1. Характеристика об'єкта ідентифікації і контролю

На паливно-енергетичний комплекс України покладається задача забезпечення економіки держави електричною та паливною енергією, природним газом, вугіллям, всіма видами моторного і котельно-пічного палива та сировинними ресурсами для різних галузей промисловості. Тому рівень розвитку енергетики має визначальний вплив на стан економіки держави. На технічному рівні ефективність роботи паливно-енергетичного комплексу визначається швидкістю впровадження нових досягнень науки і техніки. Саме тому, впровадження нових технологій, сучасних систем контролю, управління, оптимізація видобутку власних енергоресурсів є одними з основних завдань та напрямків реалізації енергетичної стратегії України на період до 2030 року [1,2].

Оскільки потреба України в нафті на сьогодні становить 28 млн.т, а власний видобуток покриває приблизно 15-18 % потреби в нафті, енергетичною стратегією планується збільшити обсяги пошуково-розвідувального буріння до 185 тис.м на рік, що майже у 6 разів перевищує фактичний обсяг пошуково-розвідувального буріння нових свердловин у 2004 році. Розрахунки показують, що за таких умов протягом прогнозного періоду (2006-2030р.р.) можливо збільшити розвідані запаси за базовим сценарієм в обсязі 63 млн.т. нафти з газовим конденсатом [1, 2].

За даними «Брітіш Петроліум-Амоко» [3] розвідані запаси газу в Україні становлять близько 1% від світових, тоді як територія – 0,3% від суходолу планети. Отже, потенціал України за ресурсами газу майже втричі перевищує середньосвітовий. Слід зазначити, що на родовищах України спостерігається тенденція до збільшення обсягів експлуатаційного буріння на підприємствах нафтогазової промисловості. Наприклад, за 9 місяців 2007р. порівняно з

відповідним періодом 2006р. спостерігається зростання експлуатаційного буріння на 6,4 % [3].

Аналіз загальносвітової тенденції розвитку буріння нафтових і газових свердловин доводить, що відбувається зростання собівартості буріння через зростання глибин проектного буріння, вартості енергоносіїв і бурових доліт. Одним із методів підвищення якості бурових робіт і оптимальної експлуатації бурової техніки є вибір вектора параметрів, які характеризують буримість геологічного розрізу свердловини. Ці параметри повинні характеризувати процес взаємодії долота з породою на будь-якій глибині свердловини [6]. Вони визначають режими експлуатації техніки, а також показники ефективності процесу буріння.

Для технологічного процесу буріння, як об'єкта керування, характерна наявність суттєвого часу запізнення і великої кількості збурень, які обмежують ефективність функціонування системи автоматичного регулювання осьової сили на бурове долото. Визначення оптимальних параметрів налаштування регуляторів для таких систем ускладнюється складністю аналітичного рішення задачі параметричного синтезу, а також відсутністю повної інформації про діючі на об'єкт параметричні і координатні збурення, зокрема про буримість гірських порід.

Слід зазначити, що саме з оцінки властивостей гірських порід слід розпочинати оптимізацію режимів буріння і оптимізацію озброєння бурових доліт. Це завдання є досить складним, оскільки необхідно отримати переконливе обґрунтування, що вибраний критерій, який характеризує міцнісні властивості гірських порід з точки зору їх руйнування, має однозначний зв'язок з буримістю породи [5,6], яка залежить від глибини свердловини (рис.1.1).

На рис.1.1 наведено два методи вибору інтервалів глибини свердловини з однаковою буримістю порід. Перший метод полягає у визначенні прямолінійних ділянок на графіку залежності глибини буріння від часу буріння. Другий – передбачає визначення оцінки відносної буримості породи в залежності від глибини свердловини.

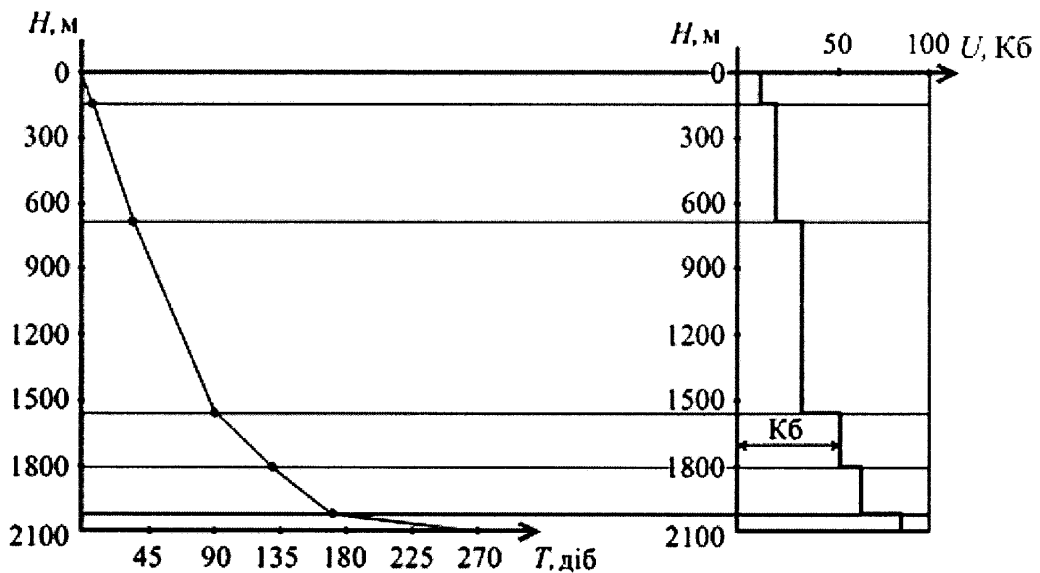


Рис. 1.1. Графіки залежностей глибини свердловини H , від часу буріння T і оцінки відносної буримості гірських порід K_δ

Дані, які отримані в результаті аналізу, свідчать про те, що будь-яка подібна кластеризація може бути виражена у вигляді середніх характеристик буримості гірських порід. Окрім того, існує можливість встановити залежність між показниками процесу буріння і характеристиками буримості з урахуванням зміни параметрів режиму буріння. В межах вказаних пачок однорідних за буримістю порід для кожного рейсу долота можуть бути досить точно запрограмовані оптимальні значення осьової сили на долото, швидкості обертання, витрати та тиску в системі циркуляції бурового розчину і гідравлічної потужності, а також встановлена мінімальна собівартість метра проходки для будь-якої заданої бурової установки. Для розробки програми буріння необхідно вивчити, яким чином впливає на показники буріння свердловини кожен із факторів, які визначають механічну швидкість буріння і роботу долота в межах інтервалів породи з однаковою буримістю [6,7].

Актуальність проблеми визначення буримості гірських порід під час буріння нафтових і газових свердловин зумовлена відсутністю поточної інформації про збурення, які виникають в процесі поглиблення свердловини, що може привести не тільки до суттєвого збільшення витрат на будівництво

свердловини, але й спричинити виникнення аварії з породоруйнівним інструментом.

Сьогодні для буріння нафтових і газових свердловин в Україні застосовуються традиційні шарошкові долота та безопорні долота типу PDC (Polycrystalle Diamand Cutter) як іноземного, так і власного виробництва. Долота типу PDC застосовуються переважно для буріння порід середніх за твердістю і неабразивних, проте даний тип доліт є надзвичайно перспективним для буріння твердих порід. Проведений аналіз показує, що на даний час співвідношення між обсягами буріння шарошковими і долотами типу PDC становить в Україні приблизно 75% і 25% відповідно, проте найближчим часом може досягти 50% і 50% [3].

Основними характеристиками спрацювання доліт типу PDC на родовищах України за даними ДП Укргазвидобування протягом 2000-2006 років є: 31% сколювання зубців; 30% - поломка зубців; 19% - відсутність спрацювання; 17% - зношення зубців; 3% - випадіння зубців. Основними причинами підймання доліт із свердловини були: 72% - досягнення проектної глибини, 19% - зміна компоновки низу бурильної колони, 3% - проблеми в стволі свердловини, 3% - падіння швидкості проходки, 3% - ремонт бурової установки. Долота вітчизняного виробництва працюють на породах середньої твердості та з пропластками міцних порід (аргіліти, доломіти, мергелі) в інтервалі глибини більше 2000м, тому для них спостерігається швидкість буріння до 2 м/год. Буріння здійснюється роторним і турбінним способами, максимальна сила на долото становить 10 кН, мінімальна – 2 кН, швидкість обертання змінювалася в межах 40-135 об/хв, проходка на долото, наприклад 11 5/8 DS 66Н, становила 4230 м. За кордоном долота PDC показують значення проходки в середньому 1067,5 м. Найвищі показники показують біцентричні долота на родовищах Омани, а саме долото BC75PX Dictntric 8,375 inc забезпечило значення проходки 4474 м, швидкість буріння 13,3 м/год. Така розбіжність в результатах і режимах буріння пояснюється [3] різницею в технічному рівні інструменту, технічному

оснащенні обладнання, застосуванням нових інформаційних технологій про властивості гірських порід, тощо.

Своєчасне визначення буримості гірських порід дасть змогу бурити свердловини з оптимальними параметрами режиму, запобігти аварійним ситуаціям та зменшити негативні наслідки від їх виникнення. Слід врахувати, що на ліквідацію ускладнень, які виникають при бурінні свердловин в однорідних інтервалах, витрачається приблизно 14% календарного часу [4].

Визначення буримості гірських порід є важливою комплексною задачею, яка зв'язана із створенням моделі оптимальної експлуатації бурової техніки, моделі вибору техніки і методу розробки проекту будівництва свердловини. Отже, можна виділити три моделі (рис.1.2), сумісне функціонування яких забезпечує рішення задачі проектування процесу поглиблення нафтових і газових свердловин [6]:

- математичну модель буримості геологічного розрізу, яка забезпечує обробку апріорної інформації про буримість гірських порід в пробурених свердловинах з метою формування коефіцієнтів буримості геологічного розрізу свердловини, яка проектується. Поряд з буримістю породи визначають такі характеристики, як твердість порід по штампу, умовну твердість, умовну абразивність, умовну суцільність та інші, в тому числі і характеристики роботи долота [4]. Це дає змогу прогнозувати градієнти тисків (гірничого, порогового гідророзриву, порушення стійкості порід) і зробити геолого-технологічну класифікацію розрізів свердловини на однорідні за буримістю порід пачки;

- математичну модель оптимальної експлуатації бурової техніки, яка формує обмеження на режими експлуатації фіксованого набору техніки і функцію мети на цій множині;

- математичну модель вибору оптимального сполучення елементів бурової техніки, яка формує множину елементів техніки, яка підлягає оптимізації. Це стосується типів бурових установок і бурильних труб, а також типів доліт, обважених бурильних труб, турбобурів.

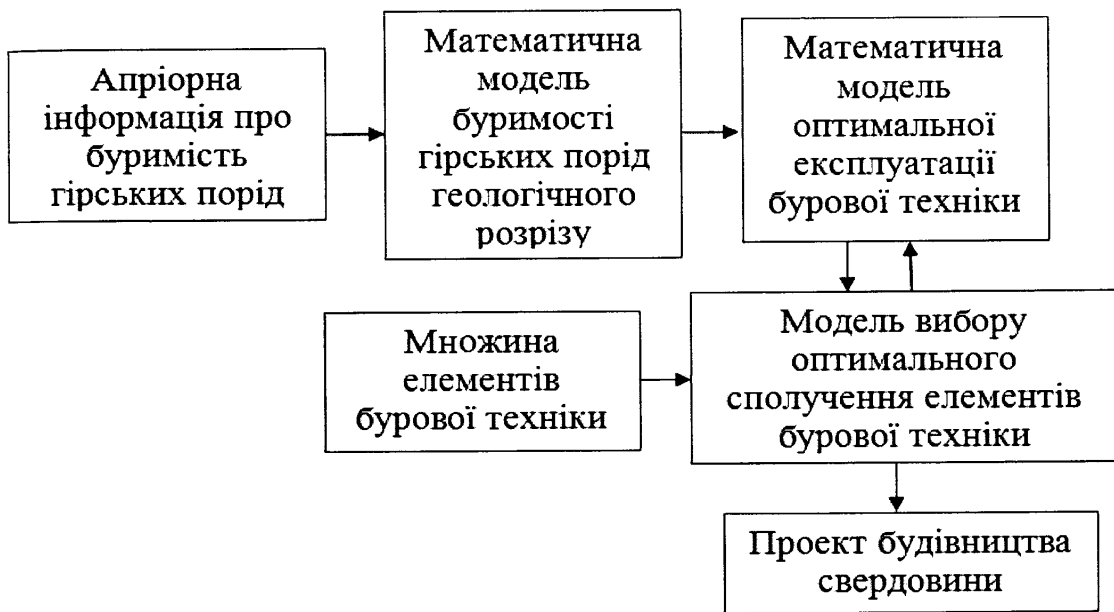


Рис. 1.2. Структурна схема взаємозв'язків математичних моделей в процесі проектування будівництва свердловин

Отже, підсумовуючи сказане вище, слід зазначити, що для підвищення точності визначення буримості гірських порід необхідно проводити визначення геолого-технічних характеристик розрізу не за результатами точкового контролю, отриманими в атмосферних умовах контактними методами, а в умовах високого тиску за результатами неперервного безконтактного контролю.

На даний час для визначення буримості гірських порід існує ряд систем та приладів. В основу даних приладів покладені такі контактні методи як аналіз керну і аналіз шламу [8,9]. Проте, найбільш широкого застосування знайшли безконтактні методи контролю буримості гірських порід на базі аналізу показників процесу поглиблення свердловин і параметрів режиму буріння [10].

Контроль буримості гірських порід під час буріння пошуково-розвідувальних та експлуатаційних свердловин вимагає вимірювання наступних параметрів (рис.1.3).

Для контролю буримості гірських порід в основному використовують методи, що базуються на вимірюванні механічної швидкості буріння

[11,12,13,14,15,16,17]. Проте, необхідність забезпечення якісного контролю буримості гірських порід на базі механічної швидкості буріння, вимагає наявності математичної моделі, придатної для використання не лише в конкретних умовах експерименту з обмеженим діапазоном зміни параметрів режиму, але й інших геолого-технологічних умовах. У зв'язку з відсутністю узагальненої формули для механічної швидкості буріння, яка б охоплювала весь комплекс фізичних явищ, що мають місце в процесі буріння і пов'язані зі зменшенням долота та руйнуванням породи, вирішення проблеми контролю буримості гірських порід може бути знайдене шляхом використання безконтактних методів на базі комплексу контрольованих показників процесу поглиблення свердловин.



Рис. 1.3. Параметри, які визначають при контролі буримості гірських порід безконтактним методом

Безконтактні методи контролю буримості гірських порід розширюють можливості контролю при бурінні долотами нового покоління (шарошковими і PDC) свердловин на різних глибинах як на суходолі, так і на шельфі морів.

З огляду на проведений аналіз характеристик об'єкта і методів контролю можна встановити вимоги до методів та технічних засобів контролю буримості порід з позицій автоматизації керування технологічним процесом буріння свердловини:

- реалізовувати автоматичні безконтактні методи контролю в режимі реального часу;
- математичну модель буримості необхідно отримати для достатньо великого інтервалу глибини і вона повинна всебічно відображати взаємодію долота з породою: руйнування породи, знос озброєння і опор долота, енергетичну взаємодію в функції режимів буріння; область визначення буримості має бути задана у вигляді обмежень на незалежні змінні;
- сигнально-ідентифікаційна модель повинна проводитись на базі вхідних даних, які отримало бурове підприємство під час експлуатаційного буріння і використовуватись в задачах керування і прогнозування; параметрична ідентифікація, яка здійснюється на базі поточної інформації, повинна використовуватись для діагностування контролю буримості гірських порід;
- технічні засоби повинні базуватись на існуючих комп'ютерних системах контролю і управління процесом буріння нафтових і газових свердловин.

1.2 Аналіз методів та засобів контролю буримості гірських порід

Ідентифікація моделі буримості гірських порід і правильне визначення буримості для кожної пачки є однією з вимог забезпечення оптимальної експлуатації бурової техніки. Ця задача набуває особливого значення у зв'язку з інтенсивним впровадженням у галузі трьохшарошкових доліт нового покоління, які забезпечують проходку на долото до 2000 м, а також алмазних доліт з проходкою на долото до 6000 м [3,12]. В результаті одним долотом розбурюється декілька різнорідних шарів порід, буримість яких треба знати, щоб визначити оптимальні параметри режиму буріння. Проте, аналіз останніх досліджень і публікацій [3,21,81,84,99,102,103,115,116,117], в яких започатковано розв'язання даної проблеми, показав, що існуючі методи контролю буримості та інформаційні моделі не відповідають сучасному рівню інформаційної забезпеченості бурових підприємств

нафтогазовидобувної галузі. Невирішеною проблемою залишається і контроль буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин.

Рішення задачі визначення буримості гірських порід може бути знайдене шляхом використання різноманітних методів, які базуються на вимірюванні механічної швидкості буріння, відношення об'єму зруйнованої породи на одиницю затраченої роботи, відношення механічної швидкості буріння до осьової сили на долото, залежності проходки за один оберт від величини осьової сили [5,11,15] та ін.

Дослідження щодо контролю буримості гірських порід проводили багато вітчизняних і зарубіжних вчених: Бінгхем М.Г., Багаутдінов Г.А., Буткін В.Д., Бревдо Г.Д., Бражніков Ю.І., Горбійчук М.І., Гулізаде М.П., Драганчук О.Т., Жуковський А.А., Козловський Є.А., Заміховський Л.М., Кукурудз С.Ф., Комаров М.А., Кулаген М.І., Когуч Я.Р., Любавін А.А., Мислюк М.А., Петров І.П., Пітерський Б.М., Сабітов Е.Х., Семенцов Г.Н., Тарасевич В.І., Цибульський В.Р., Шильман А.Б. та багато інших. Розробкою методичних керівних документів по визначенню і використанню показників властивостей гірських порід в бурінні займались науково - дослідні установи провідних підприємств нафтогазової галузі [13,17].

Аналіз сучасного стану проблеми контролю буримості показав, що найбільшого поширення мають два методи: контактні і безконтактні (рис.1.4).

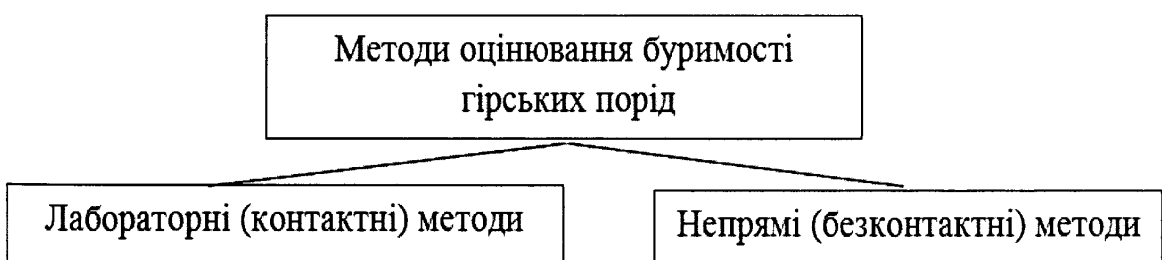


Рис. 1.4. Класифікація методів оцінювання буримості гірських порід

Контактні методи основані на дослідженнях зразків гірської породи в лабораторних умовах. Недоліком цих методів є невідповідність умов дослідження зразків породи геологічним умовам, що спостерігаються під час

буріння свердловини. Тому отримані результати не дають об'єктивної оцінки буримості породи.

Безконтактні методи використовують інформацію про результати взаємодії системи “долото-порода”: проходку, механічну швидкість буріння, момент на долоті та ін. Проте, не всі показники, що використовуються для оцінювання буримості гірських порід, піддаються вимірюванню в реальному часі.

У даному підрозділі буде проведено аналіз сучасних методів контролю міцнісних властивостей гірських порід, зокрема їх буримості [22,23].

1.2.1. Методи сигнальної ідентифікації буримості гірських порід

В геолого-технічному наряді, який є основним керівним документом для бурових бригад, широко прийнято визначати буримість гірських порід за умовними категоріями:

1 – легкої буримості; 2 – середньої буримості; 3 – важкої буримості; 4 – дуже важкої буримості; 5 – винятково важкої буримості.

Віднесення порід до тієї або іншої категорії міцності проводиться на основі механічного каротажу, який проводиться під час буріння перших свердловин на родовищі. При цьому в основі оцінки порід по категоріях міцності лежить, величина механічної швидкості буріння.

Цей метод має істотні недоліки:

- побудова графіка механічного каротажу проводиться при змінній вибійній потужності, типу долота і режимах буріння, тобто за реальних вибійних умов руйнування порід;
- при подальшому бурінні свердловин графіки механічного каротажа зазвичай не уточнюються.

Це призводить до того, що категорії міцності, відмічені в геолого-технічному наряді, не відображають дійсну буримість гірських порід під час буріння свердловини.

Закономірність зміни проходки на долото залежно від глибини вивчали Ядулаєв Н.І., Стетюха Е.І. та інші автори. Побудова кривих проходок по

численних свердловинах, пробурених в різних районах СРСР показує, що в більшості випадків зміна проходки на долото не відповідає зміні міцності порід згідно геолого-технічному наряду [14,20,32].

Під час буріння глибоких свердловин із збільшенням глибини свердловини спостерігається зменшення проходки на долото. Часто на значних інтервалах проходка на долото більш-менш постійна, а згідно геолого-технічному наряду наголошується чергування порід різної міцності.

Розглянемо пропозиції різних авторів за оцінкою буримості гірських порід при бурінні свердловин.

Шрейнер Л.А. [24,26] відзначав, що буримість гірських порід обернено пропорційна твердості порід і що характеризувати її можна механічною швидкістю буріння. При цьому розбіжності між розрахованою і фактичною буримістю можуть служити мірилом під час оцінки раціональності режимів буріння.

Протодьяконов М.М.(молодший) [25] відзначав, що питома енергія руйнування є універсальним фізичним чинником, що характеризує механічні властивості гірських порід за постійних умов руйнування.

При цьому буримість гірських порід по Протодьяконову М.М. характеризується коефіцієнтом буримості:

$$f = K_0 \frac{w \cdot t}{v}, \quad (1.1)$$

де: K_0 - коефіцієнт пропорційності [$M^1 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^2$];

w - потужність засобів руйнування [$M^2 \text{ кг} \text{ с}^{-3}$];

t - час руйнування [с^1];

v - об'єм зруйнованої породи [M^3].

У роботах Шрейнера Л.А., Якушева В.П., Петрової О.П., Портнова А.Р. [26] наголошувалося, що класифікація гірських порід на основі механічної швидкості буріння не може бути правильною ознакою і що буримість гірських порід залежить не тільки від твердості, але і від пружних, міцнісних і пластичних властивостей породи. Автори вказаної роботи відзначали, що

буримість гірських порід повинна мати деякий узагальнений показник, що характеризує всі механічні властивості даної гірської породи. За узагальнений показник рекомендувалося приймати відношення загальної роботи до крихкого руйнування до площі штампу або відношення загальної роботи до об'єму зруйнованої породи, тобто питому роботу руйнування.

Проте, ця методика визначення буримості гірських порід також стосується визначення буримості гірських порід в лабораторних умовах, але для керування процесом поглиблення свердловин потрібна оцінка буримості гірських порід в реальних вибійних умовах.

Владіславлев В.С. [27] запропонував буримість гірських порід визначати на основі механічної швидкості на оптимальному режимі буріння. Оптимальним режимом буріння вважали режим, при якому досягається вища механічна швидкість буріння даної породи інструментами даної конструкції при довершеному очищенні вибою від шламу. Було запропоновано встановити 6 класів буримості породи залежно від типу долота і механічної швидкості буріння (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Приклад класифікації буримості порід для долота типу ОМ-185

Клас буримості	I	II	III	IV	V	VI
Механічна швидкість буріння, м/год	0—5	5—10	10—15	15—20	20—25	25—30
Порода	A	B	C	D	E	M

Таким чином, приналежність тієї або іншої породи до того або іншого класу залежить від значення механічної швидкості і від типу долота.

Бадалов Р.А. [28] за критерій, характеризуючий буримість гірських порід, приймає відношення:

$$K = \frac{m}{v_0}, \quad (1.2)$$

де m - коефіцієнт, що характеризує абразивність гірських порід, [кг];

v_0 – початкова миттєва механічна швидкість, яка на думку Бадалова Р.А. характеризує твердість породи [$мс^{-1}$]. Якщо відомі дві різні механічні швидкості v_1 і v_2 , відповідні двом проходкам H_1 і H_2 для одного і того ж типу і розміру долота, то коефіцієнт буримості для даної породи визначається так:

$$K = \frac{\ln \frac{v_1}{v_2}}{H_2 - H_1}. \quad (1.3)$$

де $[v_1] = [мс^{-1}]$; $[v_2] = [мс^{-1}]$; $[H_1] = [м]$; $[H_2] = [м]$; $[K] = [м^{-1}]$.

При цьому прийнято, що падіння механічної швидкості в часі при постійному режимі роботи трьохшарошкового долота в однорідній породі відбувається по кривій, рівняння якої Бадаловим Р.А. дається у вигляді:

$$V(t) = V_0 \left(1 + k(n-1)V_0^{n-1}t \right)^{-\frac{1}{n-1}}, \quad (1.4)$$

де V_0 – механічна швидкість буріння незатупленим долотом;

k – постійне по Бадалову Р.А. число;

n – показник степеня.

Величина k використовується в математичній моделі (1.4) як коефіцієнт зносу, який є функцією режимних параметрів. Проте, якщо розглядати коефіцієнт k як постійне число, то в процесі буріння буде відсутній дрейф характеристик механічної швидкості буріння, викликаний зносом долота і наявність якого підтверджена експериментальними дослідженнями [30]

Булах Р.І. [29] відзначає, що по енергоємності доліт в кожній породі можна судити про її буримість. При цьому під енергоємністю долота розуміється здатність його відбирати від приводу енергію і витратити її на руйнування породи. Насправді долото передає потужність вибійного двигуна на вибій, і величина цієї потужності залежить від параметрів долота, параметрів режиму буріння і буримості порід.

Ще один спосіб [29] визначення буримості може бути побудований на контролі питомого моменту, тобто відношення $\frac{M_{\text{еф}}}{F_{\text{еф}}}$, яке найповніше характеризує енергоємність типорозміру долота і породи при даному режимі руйнування її і тому величина питомого моменту характеризує буримість гірських порід. Дійсно, оскільки крутний момент на долоті залежить від фізико-механічних властивостей породи, геометрії робочої поверхні долота і осьової сили на долото, тому неважко бачити, що питомий момент залежатиме від двох чинників: фізико-механічних властивостей породи; геометрії долота і робочої поверхні.

Так, для трьохшарошкового долота:

$$\frac{M_{\text{еф}}}{F_{\text{еф}}} = R_C (K_1 + \alpha K_2), \quad (1.5)$$

де R_C - середній радіус долота;

K_1 - коефіцієнт, що характеризує вплив фізико-механічних властивостей породи на зміну моменту $M_{\text{еф}}$;

K_2 - коефіцієнт, залежний від конструкції робочої поверхні долота;

$$\alpha = \frac{h_{\text{ср}}}{r_{\text{ср}}}, \quad (1.6)$$

де $h_{\text{ср}}$ - середня величина кроку зубців;

$r_{\text{ср}}$ - середній радіус шарошки.

Недоліком є те, що тільки при постійному типі долота, тобто $\alpha = \text{const}$, $K_2 = \text{const}$, $R_C = \text{const}$ зміна питомого моменту характеризуватиме зміну фізико-механічних властивостей породи, тобто її буримість. Слід зазначити, що класифікація порід за буримістю на основі питомого моменту вимагає визначення моменту $M_{\text{еф}}$ і осьової сили $F_{\text{еф}}$ у вибійних умовах в режимі максимальної механічної швидкості, що також є недоліком.

Також відомий спосіб [31] оцінювання буримості гірських порід за допомогою коефіцієнта буримості породи

$$K_6 = \frac{V_m}{F}, \quad (1.7)$$

де V_m – механічна швидкість буріння, м/с;

F – осьова сила на долото, Н.

За структурою моделі цей спосіб аналогічний до способів Владіславлева В.С. і Бадалова Р.А., проте він не вимагає наявності давачів на вибої свердловин.

Для оптимізації озброєння шарошкових доліт на стадії проектування запропоновано [5] критерій ефективності зубців, який характеризує міцнісні властивості гірських порід з точки зору їх руйнування, має однозначний кореляційний зв'язок з буримістю породи:

$$K = \frac{V(Z)P_{ш}}{\int_0^Z R(Z)dZ}, \quad (1.8)$$

де V – об'єм зруйнованої породи;

$P_{ш}$ – твердість породи за штампом;

$R(Z)$ – сила опору породи проникненню зубця;

Z – заглиблення зубця (глибина проникнення) в породу.

Запропонований критерій характеризує породу такою ж мірою як і зубець. Фізичний зміст критерію (1.8) зводиться до оцінки об'єму зруйнованої породи на одиницю витраченої роботи. Він дозволяє проводити попереднє порівняння озброєння доліт, призначених для розбурювання нових порід. За його допомогою можна також диференціювати породи, які проходить даний тип долота, за буримістю. Недоліком цього критерію є наявність в ньому такого параметру як твердість породи по штампу, яка визначається лише в лабораторних умовах.

Ще один спосіб сигнальної ідентифікації буримості гірських порід запропонований фірмою США «Fektormatic drilling didtem» [7]. Для цього користуються рівнянням буріння для інтервалів порід з однаковою буримістю породи ($K_f \cdot 10^{-5}$)

$$K_f \cdot 10^{-5} = \frac{h}{t_6 \cdot F \cdot n} = \frac{V_m}{F \cdot n}, \quad (1.9)$$

де: K_f – коефіцієнт буримості породи;

t_6 – час механічного буріння;

F – осьова сила на долото;

n – швидкість обертання ротора;

V_m – механічна швидкість буріння.

Залежність (1.9) зображають графічно шляхом нанесення середньої проходки за одну годину проти добутку $F \cdot n$ для декількох рейсів долота всередині інтервалу порід з однаковою буримістю. Нахил прямої лінії, яка усереднює найбільший розкид точок, відображає коефіцієнт розрахункової буримості породи. Під час нормальних робочих режимів буріння будь-який добуток $F \cdot n$ вважається постійною величиною. Такий метод практикується у США, проте недоліком його є ретроспективність, викликана необхідністю побудови графіків і неможливістю використання для оперативного керування процесом буріння.

Слід зазначити, що на даний час під час проектування будівництва свердловини спеціалісти ВНДІБТ для визначення буримості однорідної пачки порід користуються такими рівнянням взаємодії долота з породою [6]:

$$h(F, n, t) = \alpha(F, n) [1 - \exp(-\beta(F, n) t)], \quad (1.10)$$

$$\alpha(F, n) = a_1 F^a n^3, \quad (1.11)$$

$$\beta(F, n) = b_1 F^b n^3, \quad (1.12)$$

$$T_0(F, n) = c_1 F^c n^3, \quad (1.13)$$

$$M_{уд} = \text{const}, \quad (1.14)$$

де: h – проходка долота;

α – граничне значення проходки;

β – інтенсивність зношення озброєння долота;

T_0 – термін служби опор долота;

$M_{уд}$ – середній питомий момент на долоті;

F – осьова сила на долото;

n – швидкість обертання долота;

t – час буріння;

$\{a_1, a_2, a_3\}$, $\{b_1, b_2, b_3\}$, $\{c_1, c_2, c_3\}$ – параметри математичної моделі, які підлягають ідентифікації в конкретних умовах буріння.

Як модель буримості однорідної пачки порід приймається вектор коефіцієнтів в рівняннях (1.9) – (1.14)

$$\bar{\lambda} = (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, M_{уд}). \quad (1.15)$$

Проте, недоліком цього методу є те, що для того, щоб ці рівняння мали практичну цінність, вони мають бути прив'язані до конкретних умов на вибої свердловини. Комплекс умов на вибої свердловини вибирають із міркувань ідентичності аналітичних виразів і коефіцієнтів, які входять в рівняння (типорозмір долота, якість бурового розчину, статичний і диференціальний тиск на вибої свердловини).

1.2.2. Засоби контролю фізико-механічних властивостей гірських порід контактним методом

Визначення фізико-механічних властивостей гірських порід проводиться для оцінки їх буримості і поведінки на стінках свердловини, а також для побудови зведеного класифікаційного розрізу геологічної товщини досліджуваного району.

Для експериментального визначення класифікаційних характеристик (твердості, абразивності, суцільності) гірничих порід використовують шлам, kern або його уламки [13,17].

Твердість порід визначається стандартним методом (ГОСТ 122.88-66) по керну за допомогою приладів типу УМГР-3.

Для визначення твердості, абразивності і суцільності гірських порід в лабораторних і польових умовах по шламу і керну застосовують прилад ПШ-2, розроблений ВНДІБТ.

Твердість і абразивність гірничих порід в лабораторних умовах визначають по взірцям шламу за допомогою лабораторного приладу ИШ-2М, розробленого ВНДІБТ.

Для визначення класифікаційних властивостей гірничих порід за допомогою приладів ПШ-2 та ИШ-2М потрібні взірці шламу розміром не менше ніж 5×5 мм і товщиною не менше $0,6 \div 0,7$ мм. Відбір шламу проводять через кожні 1-3 м проходки.

Поряд з такими характеристиками як твердість порід по штампу, абразивність та іншими, визначають буримість породи і характеристики роботи долота [4].

Для попереднього розбиття геологічного розрізу на однорідні пачки гірських порід використовують принцип «ковзного вікна», який заснований на методі однофакторного дисперсного аналізу. Як розмір «ковзного вікна» використовується величина проходки за рейс в даному районі. Зсув «ковзного вікна» зверху вниз починається з відмітки башмака кондуктора свердловини. Характеристиками вікна є середньозважена величина категорії твердості T і розмах величини T в межах «вікна», а також категорії абразивності A і розмах її величини:

$$\bar{T} = \sum_1^i T_i \frac{m_i}{m_0}, \quad (1.15)$$

де: m_i – потужність i -тої породи, яка потрапила у «вікно»;

$$m_0 = \sum_1^i m_i ;$$

T_i – твердість i -го шару породи.

Величина розмаху розраховується як різниця між максимальним і мінімальним значеннями категорії твердості (або абразивності) різновидів порід в межах «вікна»

$$R_T = T_{\max} - T_{\min} ,$$

$$R_A = A_{\max} - A_{\min} .$$

Для кожного положення «ковзного вікна» визначаються середньозважені величини твердості і абразивності порід і попарне порівняння їх. Після чого визначається характерна пачка порід.

Недоліками цих методів і приладів є ретроспективність аналізу по відношенню до процесу поглиблення свердловини, експериментальні дані отримані в атмосферних умовах, а не в умовах високого тиску і неможливість використати результати для керування процесом буріння в реальному часі.

Для дослідження фізико-механічних властивостей гірських порід використовується також віброакустичний каротаж [35].

Метод заснований на вивченні характеру зміни поздовжніх і поперечних хвиль, що виникають у буровому устаткуванні і в масиві гірських порід у процесі роботи долота на вибої. У практиці роботи найбільше поширення одержав спосіб вимірів вібрацій верхньої частини бурильної колони.

Віброакустичний каротаж може застосовуватися для вирішення геологічних задач (літологічне розчленовування розрізу, виділення колекторів) і технологічних (визначення стану зносу долота і частоти його обертання).

При проведенні віброакустичного каротажу реєструється спектр коливань у широкому діапазоні часто (0-5000 Гц).

Інтерпретація кривих віброакустичного каротажу полягає в аналізі характеру зміни форми й амплітуда зареєстрованого сигналу. Форма сигналу відображає особливості взаємодії долота з гірською породою і залежить від твердості породи і режиму буріння. Із збільшенням твердості розбуреної породи зростає амплітуда сигналу вібрації. Частота коливань при цьому змінюється пропорційно навантаженню на долото і частоті його обертання. У м'яких породах форма коливання близька до синусоїдальної, у породах середньої твердості симетрія форми сигналів знижується, а в породах твердих в сигналі спостерігаються сплески великої амплітуди. При зносі озброєння

долота зменшується механічна швидкість буріння внаслідок чого зменшується амплітуда вібрації.

Отже на основі вібрацій, які вимірюються з верхнього кінця колони бурильних труб, можна отримати інформацію про механічні властивості гірських порід, частоту обертання долота та ін. Проте, спектр вібрації на долото $S_d(\omega)$ суттєво відрізняється від спектру на поверхні $S_n(\omega)$. Зв'язок між ними виражається співвідношенням

$$S_n(\omega) = K(\omega) S_d(\omega), \quad (1.16)$$

де $K(\omega)$ – коефіцієнт передачі сигналу.

Крім того, слід зазначити, що сигнал S_d , який створюється вібрацією долота, спотворений адитивними A і мультиплікативними M завадами. В результаті сигнал X , що вимірюється на поверхні, дорівнює

$$X = M S_d + A. \quad (1.17)$$

Це означає, що для повного відтворення динаміки процесу взаємодії долота з породою вибою свердловини необхідно мати системи обробки даних в реальному часі. Структуру такої системи наведено на рис.1.5.

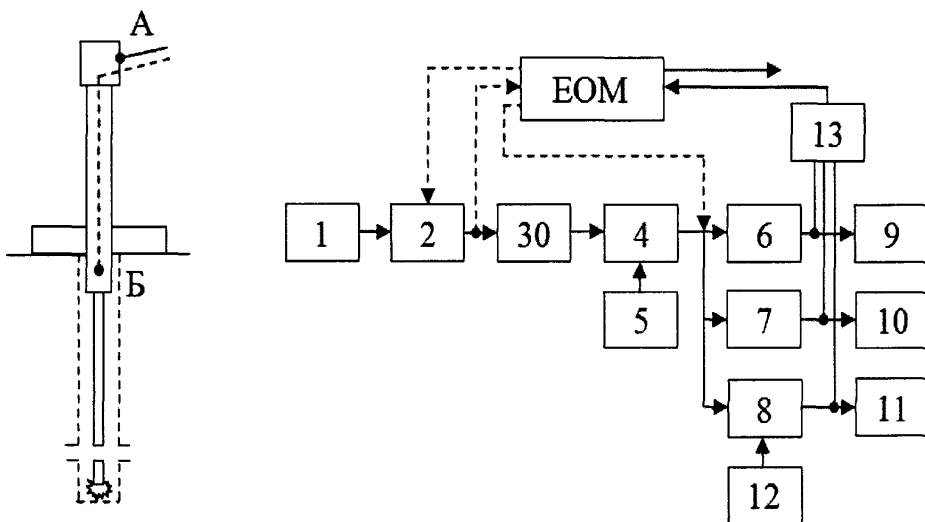


Рис. 1.5. Структура системи обробки даних про вібрацію долота:

1 – вимірювальний перетворювач вібрації; 2 – фільтр; 3 – аналізатор сигналу; 4 – корелятор; 5 – блок вихідних даних; 6,7,8 – аналізатори сигналу; 9,10 – показуючі пристрої; 11 – реєструючий пристрій; 12 – пристрій вводу даних про величину проходки долота; 13 – пристрій вводу даних в ЕОМ.

Система складається із вимірювального перетворювача вібрацій 1, двох давачів вібрацій, встановлених на вертлюгу А або квадраті Б, фільтру 2, аналізатора сигналу 3, блоку кореляції 4, блоку вихідних даних 5, аналізаторів сигналу 6,7,8 для визначення механічних властивостей породи, зносу долота і частоти його обертання, пристрою 12 вводу даних про величину проходки для індикації даних механічного каротажу як функції глибини свердловини, пристрою 13 вводу даних в ЕОМ для розрахунку параметрів режиму буріння.

Недоліком цієї системи контролю є обмеженість використання для безопорних доліт нового покоління типу PDC з полікристальним озброєнням, складністю обробки інформації адитивних і мультиплікативних завад і постійним зростанням довжини каналу передачі інформації.

1.2.3. Аналіз засобів безконтактного контролю буримості гірських порід

На даний час відомо декілька пристроїв контролю буримості гірських порід безконтактними методами, основні з яких базуються на інформації про показники зношування озброєння шарошкових доліт. У цих приладах використовується взаємозв'язок процесів зношування породоруйнівного інструменту і руйнування породи під час їх взаємодії. Властивість породи руйнуватися під впливом породоруйнівного інструменту, що контактує з нею, в процесі їх взаємодії і є буримістю гірської породи.

Під абразивністю гірської породи розуміють її спроможність зношувати породоруйнівний інструмент, що контактує з нею в процесі їх взаємодії.

Отже буримість породи щільно зв'язана з її абразивністю.

В інституті НДІОГР розроблений і випробуваний прилад ПАЗС-1 для автоматичного запису безпосередньо на бурових верстатах такого показника буримості як механічна швидкість буріння у функції від глибини свердловини [18]. Прилад показав високу надійність роботи в промислових умовах (при наявності вібрації, запиленості й інших ускладненнях). Як записуючий елемент у приладі використовується кулькове перо або олівець і, оскільки при цьому

момент опору обертання пишучого пристрою досягає значної величини, прилад виконаний у виді системи, що стежить. Схема приладу ПАЗС-1 показана на рисунку 1.6. Вимірювальний вал 1 за допомогою електромагнітної муфти 2 і контактів керуючого реле Р під час робочого циклу з'єднується з механічним диференціалом 3. З іншої сторони механічний диференціал 3 через муфту 4 з'єднаний із двигуном постійного струму 5. Сонячне колесо диференціала жорстко з'єднано з пишучим пристроєм і потенціометром 6, який з'єднаний електрично з входом транзисторного підсилювача 7; за допомогою останнього приводиться обертання електродвигуна 5. Двигун 5 обертає також механізм протягання діаграмної стрічки 8.

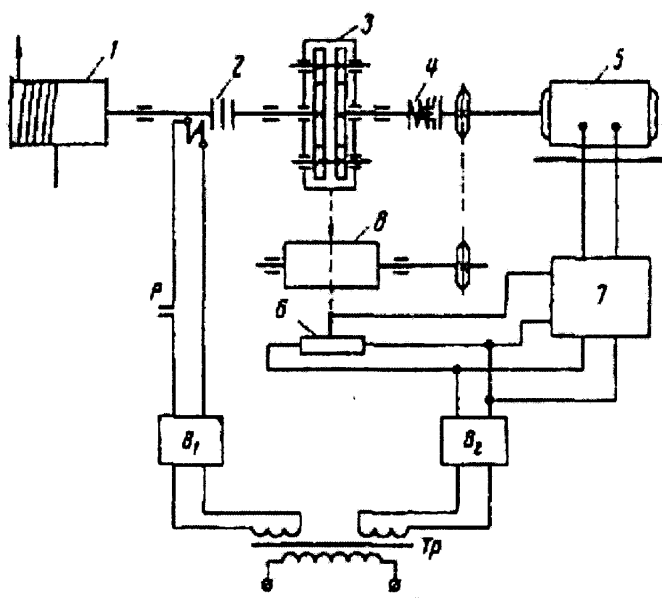


Рис. 1.6. Схема приладу ПАЗС-1

Вал 1 з'єднується з органом бурового верстата, за допомогою тросової або іншої передачі. При бурінні з деякою швидкістю V вал 1 обертається з окружною швидкістю і пересуває движок потенціометра 6, унаслідок чого двигун 5 одержує живлення і починає обертатися, пересуваючи диференціал 3 і діаграмну стрічку 8. Швидкість обертання двигуна 5 пропорційна швидкості буріння V , а швидкість пересування стрічки 8 — глибині свердловини H . Прилад дозволяє записувати швидкість буріння від 1 до 100 м/год і має масштаби запису глибини свердловини 1:25, 1:50, 1:75, 1:100. Якщо прилад

включається тільки під час буріння, на діаграмі по одній осі буде записана швидкість буріння, а по іншій — глибина свердловини.

На верстатах шарошкового буріння 2СБШ-200 і БСШ-2м ця умова забезпечується автоматичним блокуванням ланцюга живлення приладу за допомогою реле автоматичного буріння (РАБ), яка є в схемі верстата, що вимикається тільки в процесі буріння.

Прилад розрахований на тривалу роботу без заміни пера, має невелику вагу (8 кг) і малі габарити (250 × 200 × 320 мм). Це дозволяє встановлювати його постійно або тимчасово в будь-якому місці, зручному для з'єднання вала 1 з органом бурового верстата, що подає буровий інструмент.

Прилад ПАЗС-1 був встановлений у плетінні щогли верстата 2СБШ-200 і використовувався для визначення буримості гірських порід і досліджень процесу при ручному й автоматичному керуванні режимом буріння.

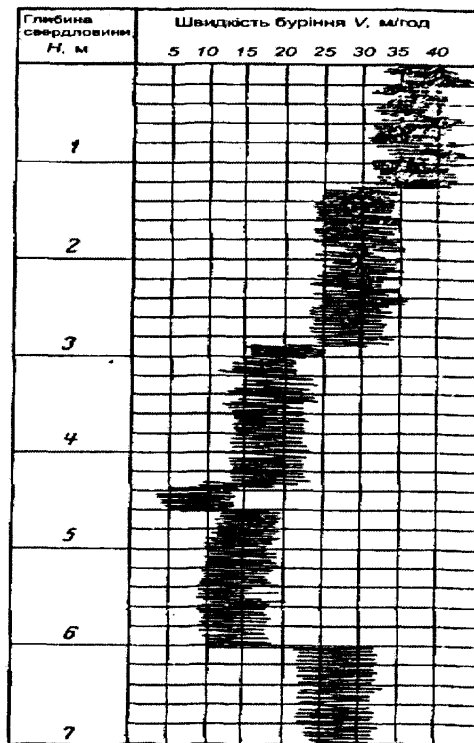


Рис. 1.7. Зміна швидкості буріння по глибині свердловини, записана приладом ПАЗС-1

На рис. 1.7 показаний зразок запису залежності $v = \varphi(H)$, отриманої при буріння верстатом 2СБШ-200 з постійними параметрами режиму (швидкість

обертання долота $n = 100$ об/хв, осьова сила на долото $F=12$ кН, кількість стиснутого повітря $Q=18$ м³/хв.). Буріння проводилось долотом 1К-214ТК по піщаниках змінної міцності пошарового залягання. З графіка видно, що швидкість буріння по глибині свердловини неоднакова і що шари піщанику різні по міцності і потужності залягання. Маючи подібні графіки в різних точках буріння порід, можна побудувати геологічні розрізи і розрахувати середню величину швидкості буріння свердловини.

Криві зміни швидкості буріння від глибини свердловини дозволяють також виявити найбільш характерні особливості зміни й ефективність процесу шарошкового буріння в залежності від способу керування режимом.

Перевагою цього приладу є можливість проводити досить тривалі виміри швидкості буріння для визначення категорії буримості порід, норм виробітку, побудови геологічних розрізів, встановлення закономірностей зміни швидкості буріння і часу роботи доліт при дослідженні їхньої зносостійкості і для інших цілей виробничого і наукового характеру.

Недоліки: значний вплив на результати вимірювань похибки вимірювання глибини свердловини, неоднорідності фізико-механічних властивостей порід, а також використання двигуна, реле, електромагнітної муфти і аналогового реєструючого пристрою.

Безконтактним методом можна контролювати буримість гірських порід і за допомогою вимірювання таких показників як середня механічна швидкість, рейсова швидкість і їх співвідношення [36]. Для цього був розроблений аналізатор, спрощена схема якого наведена на рис.1.8.

Його основним блоком є обчислювальний пристрій на базі вимірювальних систем. Рейсова швидкість V_p вимірюється за допомогою стежної системи, яка складається із вимірювальної схеми з елементами R_h , R_t , $R_{оп}$, R_{V_p} , R_{mV_p} , електричного підсилювача ІП, реверсивного двигуна ІД, обчислювального пристрою ОП. Останні механічно зв'язані з двигуном опору R_{V_p} , показуючим і реєструючим пристроями рейсової швидкості V_p , а також з пристроєм, визначаючим її максимальне значення. Зміна проходки від давача

перетворюється в зміну опору R_h , час буріння t_6 . Момент максимуму рейсової швидкості фіксується пристроєм ПВ. Після цього програмний пристрій за допомогою схеми керування СК2 здійснює необхідні перемикання. В результаті ползуном опору $R_{\Delta h}$ з'єднується механічно на деякий час Δt з ползунком опору R_h , тобто сприймає величину проходки Δh за час Δt . Це відповідає середньому значенню механічної швидкості буріння $V_{\Delta t}$ за деякий проміжок часу, яка є оцінкою буримості гірських порід на інтервалі проходки Δh .

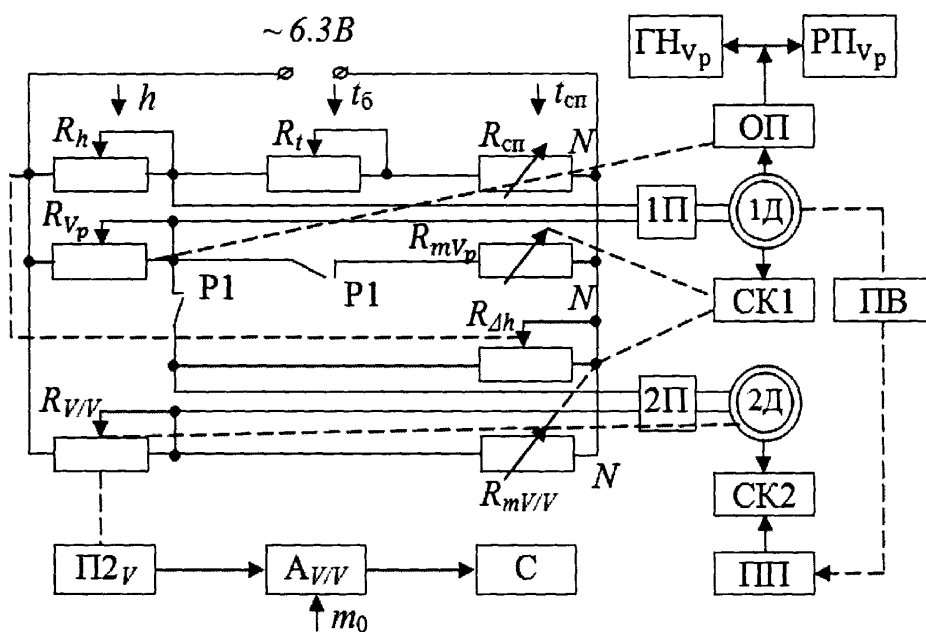


Рис. 1.8. Спрощена електрична схема пристрою аналізу буримості:

СК1, СК2 – схеми керування; ПП – програмний пристрій; 1Д, 2Д – реверсивні двигуни; ОП – обчислювальний пристрій, ПВ – пристрій визначення V_{pm} ; П1, П2 – показуючі пристрої; РП_{Vp} – реєструючий пристрій; А – аналізатор V/V ; С – сигналізація; m_0 – задана величини відношення V_p/V

До недоліків даного методу можна віднести значний вплив на результати вимірювань часу спуско-підймальних операцій, який встановлюється вручну апріорі, тобто до початку рейса долота, а також велика кількість контактних елементів, які знижують надійність пристрою.

Більш досконалим є метод контролю буримості, що базується на визначенні умовного зносу долота $\varepsilon = \frac{1}{V}$, який в ході буріння змінюється в

межах від $\varepsilon_y = \varepsilon_{y_0} = \frac{1}{V_0}$ до $\varepsilon_y = \infty$ при $V \rightarrow 0$. З точки зору оцінки буримості гірських порід і ефективності процесу буріння заслуговує увагу похідна ε по проходці долота h . Похідна $\frac{d\varepsilon}{dh}$ при $t=0$ тим менша, чим менша інтенсивність зміни умовного зносу бурового долота K_i . Остання залежить впершу чергу від буримості породи, її абразивних властивостей, а також типорозміру долота і режимних параметрів. Інтенсивність умовного зносу озброєння бурового долота може бути визначена за такою формулою [37]:

$$K_i = \frac{\Delta V}{V_1 V_2 \Delta t_{1,2}}, \text{ або } K_i = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta h \Delta t_{1,2}}, \quad (1.17)$$

де: ΔV – приріст механічної швидкості буріння;

V_1, V_2 – механічна швидкість буріння відповідно на початку і в кінці часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$;

$\Delta t_{1,2}$ – час між двома суміжними циклами вимірювання середніх механічних швидкостей;

Δh – приріст проходки;

Δt_2 – час, який відповідає Δh в кінці часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$;

Δt_1 – час спочатку часового інтервалу $\Delta t_{1,2}$.

Якщо замінити $V_1 = \frac{\Delta h}{\Delta t_1}$ і $V_2 = \frac{\Delta h}{\Delta t_2}$, і вважати, що $\Delta h = \text{const}$ і $\Delta t_{1,2} = \text{const}$,

то вираз (1.17) можна представити у такому вигляді:

$$K_i = c(\Delta t_2 - \Delta t_1), \quad (1.18)$$

де c – постійна приладу.

Цей вираз (1.18) являє собою алгоритм функціонування інформаційно-вимірювального приладу для контролю інтенсивності умовного зношення долота і, отже, буримості порід, з якою вона зв'язана.

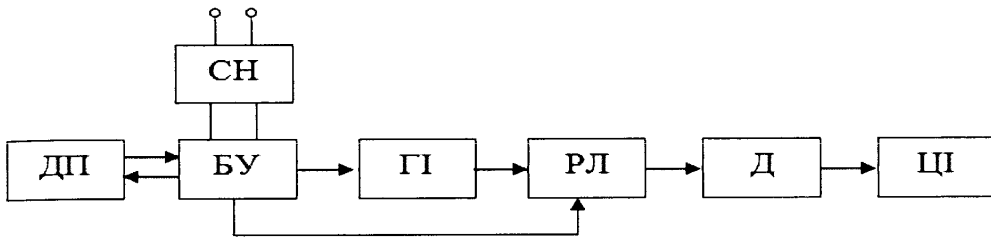


Рисунок 1.9. Блок-схема пристрою для автоматизованого контролю інтенсивності зношення долота:

ДП – давач проходки;

СН – стабілізатор напруги;

ГІ – генератор імпульсів;

РЛ – реверсний лічильник;

ЦІ – цифровий індикатор;

Д – дешифратор;

БУ – блок управління.

Блок-схема пристрою (рис.1.9) працює за таким алгоритмом:

- перетворювати два сумісних прирости проходки Δh , зсунутих в часі на величину $\Delta t_{1,2}$ в часові інтервали;
- заповнити інтервали часу Δt_1 і Δt_2 імпульсами з постійним періодом, тобто здійснити перетворення аналогової величини Δh в дискретну;
- відняти із кількості імпульсів, які пропорційні інтервалу часу Δt_2 , кількість імпульсів, яка пропорційна Δt_1 ;
- представити різницю імпульсів у формі, яка зручна для візуалізації і реєстрації.

Перевагами цього методу автоматизованого контролю є те, що крім інтенсивності зношення долота, воно дозволяє контролювати умовний знос озброєння долота і механічну швидкість буріння, яка дозволяє судити про буримість породи. Недоліком є те, що початкове значення умовного зносу долота залежить від початкового значення механічної швидкості буріння незатупленим долотом, що вносить певну невизначеність в результати контролю буримості порід.

1.3. Аналіз проблем, які виникають при розробці методів

безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід і вибір методу

Слід зазначити, що досі не існує єдиної думки науковців щодо методу визначення буримості порід під час поглиблення свердловини. Проведений аналіз методів і засобів контролю буримості гірських порід показав, що у порівнянні з іншими методами, метод, що базується на вимірюванні показників роботи долота, зокрема умовного зносу, характеризується більшою універсальністю і може бути використаний для контролю буримості гірських порід різної міцності при контролі показників процесу поглиблення свердловин. Цей метод має високу швидкодію вимірювань і можливість контролювати буримість порід різної товщини в реальному часі.

Отже підсумовуючи вищесказане, незважаючи на різноманітність безконтактних методів контролю буримості гірських порід, їх переваги та недоліки, головною проблемою залишається те, що об'єкт контролю не може бути описаний за допомогою традиційних моделей, прийнятих в теорії ідентифікації. Це пояснюється тим, що даний об'єкт контролю відноситься до класу погано визначених об'єктів, що мають нелінійні статистичні і динамічні характеристики [19,38,39]. Мається на увазі, що процес руйнування гірських порід у свердловині на великій глибині є нелінійним динамічним об'єктом, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності і перебуває під впливом різного типу завад.

З іншого боку, користуючись інформацією про характер зміни показників зношення озброєння долота, є можливість оцінити буримість гірських порід в реальному часі.

Ще одна проблема, з якою доводиться стикатися при розробці методу автоматичного контролю буримості гірських порід, це наявність в моделях буримості параметрів, які не піддаються вимірюванню, і залежність показників

буримості від параметрів режиму буріння.

Знизити похибку контролю буримості гірських порід можна при бурінні в однорідних пачках порід в режимі, коли добуток $F \cdot n = \text{const}$. Тоді показник інтенсивності зношення озброєння долота K_i не залежить від затуплення долота і в часі не міняється. Слід відзначити, що інтенсивність умовного зносу долота K_i має мінімум як функція параметрів режиму буріння F і n , тобто [31,52,72]

$$K_i(F, n) \rightarrow \min. \quad (1.19)$$

Враховуючи перелічені вище проблеми, які виникають при створенні автоматизованого способу контролю буримості гірських порід та зменшення їх впливу, дають змогу розробити безконтактний метод контролю буримості гірських порід в реальному часі, спростити системи контролю і підвищити вірогідність і ефективність контролю.

1.4. Вибір та обґрунтування напрямку досліджень

Для зручності вибору раціонального методу безконтактного контролю буримості гірських порід об'єднаємо переваги і недоліки проаналізованих методів у таблицю 1.2.

Проведений аналіз об'єкта досліджень свідчить про те, що для рішення задачі оптимальної експлуатації бурової техніки необхідно проводити контроль буримості гірських порід в реальному часі як основного джерела зовнішніх збурень не тільки з метою проектування свердловин, але й для оптимізації режиму ведення процесу механічного буріння, який задається сполученням витрати бурового розчину, осьової сили на долото, швидкості обертання долота і часу буріння.

Аналіз відомих методів та засобів контролю буримості гірських порід свідчить про те, що:

- взагалі існує чотири підходи до контролю буримості гірських порід, які базуються на вимірюванні механічної швидкості буріння, контролю питомої

енергії руйнування породи, визначення коефіцієнту буримості і вектору параметрів механічної моделі;

- з огляду на проведенний аналіз можемо стверджувати, що найбільшого застосування знайшли методи контролю буримості з використанням як інформативного параметру середньої механічної швидкості буріння. Обробка цього показника роботи долота дає змогу отримати інформацію про зношення долота, руйнування породи, проходку та ін.

Таблиця 1.2

Інформативні параметри, на яких базуються методи безконтактного контролю буримості гірських порід

Інформативні параметри	Переваги	Недоліки
1	2	3
<p>Механічна швидкість буріння</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Середня механічна швидкість буріння може відображати буримість гірських порід; • дозволяє вивчати дані промислових досліджень; • дає змогу проводити тривалі неперервні вимірювання безпосередньо в процесі поглиблення свердловин; • висока швидкість вимірювання; • можливість встановлення моменту логічного завершення рейсу долота; • можливість побудови геологічних розрізів; • дозволяє отримати рівняння, які описують процес буріння; • дає змогу співставити дані в гірничій і нафтовій галузі промисловості. 	<ul style="list-style-type: none"> • Необхідність мати постійні умови руйнування гірських порід, постійну потужність на вибої на даному геологічному розрізі свердловини, постійні умови очистки вибою від вибуреної породи, оптимальний режим буріння; • значний вплив на результати вимірювання похибки вимірювання глибини свердловини, неоднорідності фізико-механічних властивостей порід; • складність інтерпретації результатів вимірювання; • залежність результатів вимірювання від параметрів режиму буріння і зносу долота.

Продовження табл.1.2.

1	2	3
Питома енергія руйнування породи	<ul style="list-style-type: none"> • дозволяє проводити попереднє порівняння типів озброєння доліт, призначений для розбурювання певних порід; • дозволяє визначити буримість в реальних умовах вибою свердловини. 	<ul style="list-style-type: none"> • Необхідність постійних умов руйнування і потужності на вибої, геометрії і типу долота, зносостійкість озброєння; • наявність в критерії неконтрольованих параметрів: твердості породи за штампом, сили опору проникнення зубця, заглиблення зубця і об'єму зруйнованої зубцем породи.
Коефіцієнт буримості	<ul style="list-style-type: none"> • Дозволяє визначити коефіцієнт буримості гірських порід за результатами буріння; • базується на аналізі реальних промислових даних. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ретроспективність аналізу; • необхідність будувати графіки; • неможливість використати для оперативного керування процесом поглиблення свердловини
Вектор параметрів математичної моделі буріння свердловин	<ul style="list-style-type: none"> • Використана математична модель процесу взаємодії долота з породою; 	<ul style="list-style-type: none"> • Рівняння не прив'язані до конкретних умов буріння; • втрачається багато часу на проведення експерименту з метою ідентифікації параметрів моделі; • інформація про буримість порід може бути використана лише для буріння наступних свердловин.

• основними джерелами інформації для визначення буримості порід є інформація, яку отримують в процесі оперативного керування роботою долота. Крім об'єктивного характеру інформації в необхідному обсязі у цьому випадку є змога втручатися в хід процесу і вибирати алгоритм керування інформацією в

об'ємі, який достатній для визначення коефіцієнтів буримості породи для кожного рейсу долота;

- додатковим джерелом інформації про результати роботи доліт є статистичні дані для аналізу, представлені витягами з бурових журналів. Така інформація є менш докладною і не дозволяє отримати коефіцієнти буримості по кожному довбанню, але велика її кількість дозволяє групувати довбання різних свердловин, що буряться на даній площі;

- підвищення продуктивності безконтактного контролю буримості порід та розширення сфери його застосування на свердловини різних видів можливе шляхом удосконалення даного методу.

Тому метою даної роботи є розробка методу ідентифікації та безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин на засадах визначення закономірностей формування інформаційних сигналів, які характеризують опірність порід руйнуванню долотом, та алгоритмічного і програмного забезпечення для його реалізації.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

2.1. Методи оцінки буримості гірських порід

Буримість гірських порід можна визначити як здатність гірської породи чинити опір руйнуванню у процесі буріння [32,43,88,106,107,109,110].

Оцінка буримості гірських порід по всьому геологічному розрізу є необхідною умовою для успішного буріння нафтових і газових свердловин. Інформація про буримість є передумовою вибору раціонального типу долота і оптимізації процесу буріння.

Поточний контроль за буримістю дає змогу розбити породу, що розбурюється, на окремі пачки, і віднести їх до однієї із п'яти категорій: 1 – легкої буримості; 2 – середньої буримості; 3 – важкої буримості; 4 – дуже важкої буримості; 5 – винятково важкої буримості.

Задача розділу гірської породи на пачки нашттовується на ряд труднощів, які пов'язані з нестационарністю процесу буріння і відсутністю прямих методів контролю показників, які характеризують систему «порода-долота». Незважаючи на те, що буримість є об'єктивною характеристикою гірської породи, вона може проявлятися лише у взаємодії бурового інструменту з породою. Тому буримість у промислових умовах можна оцінювати лише через зміну певних технологічних параметрів, які характеризують технологічний процес механічного буріння. На основі спостереження за такими показниками можна сформулювати наступні оцінки буримості гірських порід:

- початкова механічна швидкість буріння v_0 ;
- тривалість буріння фіксованого значення проходки t_f ;
- величина проходки за фіксований час h_f ;
- енергоємність буріння одиниці ствола E ;
- питома енергія руйнування породи E_n .

Початкова механічна швидкість буріння

Механічна швидкість буріння визначається як параметрами режиму буріння, типом долота, так і фізико-механічними властивостями гірських порід [10]:

$$v_t = v_0 \varphi(t) , \quad (2.1)$$

де $\varphi(t)$ – функція зносу долота.

Із рівняння (2.1) визначимо

$$\varphi(t) = \frac{v_t}{v_0} . \quad (2.2)$$

Таким чином функція $\varphi(t)$ характеризує темп падіння механічної швидкості внаслідок зношення озброєння долота. Вона є функцією режимних параметрів процесу буріння і абразивності гірських порід [33,34].

Отже, буримість і абразивність гірських порід зв'язані між собою і цей зв'язок проявляється через механічну швидкість буріння; зі збільшенням часу t швидкість буріння зменшується при незмінних режимних параметрах.

Звідси можна зробити висновок, що лише для доліт, знос озброєння долота яких для певних інтервалів глибин незначний, оцінювати буримість можна за механічною швидкістю буріння v_t .

Для опису зміни механічної швидкості буріння автором роботи [28] запропонована залежність

$$\frac{dv_t}{dt} = -K_v v_t^m , \quad (2.3)$$

де K_v – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зношення долота і залежить від абразивних властивостей породи;

m – ціле додатне число, яке належить множині N : $N = \{0,1,2,3\}$.

Продиференціюємо рівняння (2.1) за змінною t :

$$\frac{dv_t}{dt} = v_0 \frac{d\varphi(t)}{dt} . \quad (2.4)$$

Порівнявши праві частини рівнянь (2.3) і (2.4), отримаємо:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -K_v v_0^{m-1} \varphi^m(t), \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) дає змогу визначити функцію зносу долота $\varphi(t)$ при різних значеннях m і при початковій умові $\varphi(0)=1$. Результати розв'язку рівняння (2.5) зведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Залежності функції зносу долота від часу t

Функція зносу	Значення m			
	0	1	2	3
$\varphi(t)$	$1 - K_R t,$ $K_R = \frac{K_v}{v_0}.$	$e^{-K_v t}.$	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t},$ $K_\varepsilon = v_0 K_v.$	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t}},$ $K_q = 2K_v v_0^2.$

Проведений аналіз показує, що механічна швидкість буріння навіть при постійних режимних параметрах і в однорідних породах не залишається незмінною, а зменшує своє значення в залежності від абразивних властивостей гірських порід. Тому оцінкою буримості гірської породи може слугувати початкова швидкість буріння за умови, що відомі певні базові режимні параметри. Така оцінка не може бути кількісною, а лише якісною, як про це говорилося раніше.

Тривалість буріння фіксованого значення проходки

Оцінка за цим показником здійснюється за часом t_k , який витрачається на буріння фіксованої проходки на долото h_ϕ при незмінних режимних параметрах і в однорідних породах

Оцінимо час t_k , для цього скористаємося рівнянням

$$\frac{dh}{dt} = v_t.$$

Враховуючи значення v_t , яке визначається рівнянням (2.1), отримаємо

$$\frac{dh}{dt} = v_0 \varphi(t). \quad (2.6)$$

Інтегрування рівняння (2.6), з врахуванням того, що $h(t_k) = h_\phi = \text{const}$, для значень $\varphi(t)$, що визначаються (табл.2.1), дає змогу визначити t_k . Результати обчислень зведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Значення часу буріння t_k для різних значень m

Час буріння	Значення m			
	0	1	2	3
t_k	$\frac{v_0}{K_v} \left(1 - \left(1 - h_\phi \frac{2K_v}{v_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$	$-\frac{1}{K_v} \ln \left(1 - h_\phi \frac{K_v}{v_0} \right)$	$\frac{1}{v_0 K_v} (e^{h_\phi K_v} - 1)$	$\frac{1}{2K_v v_0} ((h_\phi K_v v_0 + 1)^2 - 1)$

Слід зазначити, що величина K_v , яка є оцінкою абразивних властивостей гірської породи, для різних моделей v_t , структура яких визначається значенням степені m , має різну розмірність і відповідно буде мати різні значення навіть при незмінних режимних параметрах.

Аналіз табл.2.2 показує, що час t_k , який витрачений на буріння фіксованого інтервалу h_ϕ , визначається, не тільки початковою швидкістю v_0 , але й коефіцієнтом K_v , тобто t_k залежить як від буримості, так і від абразивних властивостей гірської породи.

Величина проходки за фіксований час t_ϕ

У даному випадку визначається величина проходки h_k за фіксований час t_ϕ , за значенням якої оцінюють буримість гірських порід.

Якщо заданий час t_ϕ , то значення проходки h_k можна знайти, проінтегрувавши рівняння (2.6) з початковою умовою $h(0) = 0$ і, прийнявши до уваги значення $\varphi(t)$, яке визначається (табл.2.1). У результаті отримаємо значення, які помістимо у табл.2.3.

Таблиця 2.3

Значення проходок h_k при фіксованому часі буріння t_ϕ

Проходка	Значення t			
	0	1	2	3
h_k	$\frac{v_0^2}{2K_v} (1 - (1 - K_R t_\phi)^2)$	$\frac{v_0}{K_v} (1 - e^{-K_v t_\phi})$	$\frac{1}{K_v} \ln(K_v v_0 t_\phi + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0} ((2K_v v_0^2 t_\phi + 1)^{1/2} - 1)$

Таким чином, як і в попередньому випадку, величина проходки при фіксованому часі t_ϕ , постійних режимних параметрах і в однорідній породі характеризує як буримість, так і абразивність гірської породи.

Енергоємність буріння одиниці ствола

Автори робіт [15,52,72] пропонують оцінювати буримість гірських порід з використанням показника

$$E = K_E \frac{F\omega}{v_t},$$

де K_E - коефіцієнт розмірності, м/с ;

F – осьова сила на долото;

ω – частота обертання долота.

Якщо вибрати $v_0 = K_E$, то

$$E = \frac{v_0}{v_t} P \omega .$$

Враховуючи, що $\frac{v_0}{v_t} = \varphi(t)$, отримаємо $E = \varphi(t)F\omega$. У тому випадку, коли

$W = F\omega = \text{const}$, будемо мати:

$$E = W\varphi(t) .$$

Остання формула показує, що енергоємність буріння одиниці ствола характеризує як буримість, так і абразивні властивості гірської породи.

Питома енергія руйнування породи

Для умов буріння свердловини у роботі [32] буримість гірських порід оцінюється наступним чином

$$E_{\Pi} = k_e \frac{wt_6}{ad^2h},$$

де k_e – коефіцієнт пропорційності;

w – потужність, що витрачається на руйнування гірських порід;

t_6 – час буріння;

a – коефіцієнт, який враховує зміну діаметра свердловини при бурінні;

d – діаметр долота;

h – проходка на долото за час t .

Якщо враховувати ту обставину, що середня швидкість буріння

$$v_{cp} = \frac{h}{t_6},$$

$$\text{то} \quad E_{\Pi} = k_e \frac{w}{av_{cp}d^2}. \quad (2.7)$$

Знайдемо середню швидкість буріння

$$v_{cp} = \frac{1}{t_6} \int_0^{t_6} v(t) dt.$$

Оскільки $v(t) = v_0\varphi(t)$, то

$$v_{cp} = \frac{v_0}{t_6} \int_0^{t_6} \varphi(t) dt.$$

У тому випадку, коли $\varphi(t)$ визначається із табл. 2.1, то для $m = 0$ будемо мати

$$v_{cp} = \frac{v_0}{t_6} \int_0^{t_6} (1 - K_R t) dt.$$

Із останнього рівняння отримаємо

$$v_{cp} = v_0 \left(1 - \frac{1}{2} K_R t_6 \right),$$

або враховуючи те, що $K_R = \frac{K_v}{v_0}$, будемо мати:

$$v_{cp} = \left(v_0 - \frac{K_v}{2} t_6 \right). \quad (2.8)$$

Якщо (2.8) підставити у (2.7), то

$$E_{II} = K_e \frac{w}{\left(v_0 - \frac{K_v}{2} t_6 \right) ad^2}.$$

Аналогічно знаходимо значення E_{II} для інших значень $\varphi(t)$, які наведені у табл. 2.1. У результаті отримуємо таблицю 2.4.

Таблиця 2.4

Питома енергія руйнування породи у функції від показника m

Питома енергія	Значення m			
	0	1	2	3
E_{II}	$\frac{K_e w}{\left(v_0 - \frac{K_v}{2} t_6 \right) ad^2}$	$\frac{K_e w}{\frac{v_0}{t_6 K_v} (1 - e^{-K_v t_6}) ad^2}$	$\frac{K_e w}{t_6 K_v} \ln(K_v v_0 t_6 + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0 t_6} \left((2K_v v_0 t_6 + 1)^{1/2} - 1 \right)$

Визначення буримості за питомою енергією автори роботи [32] пропонують визначати при постійних w і при незмінному типові долота, знос зубців долота повинен бути мінімальним.

Остання умова витікає із аналізу табл.2.4. Оскільки при $w = \text{const}$ і для однорідної породи $K_e w / (ad^2) = \text{const}$ і оцінка буримості буде визначатися не тільки величиною v_0 , але й значенням K_v , яке характеризує абразивність гірської породи.

Як показали дослідження [11] із збільшенням глибини свердловини зростає гідростатичний тиск, збільшується їх щільність, пластичність. Так, дослідження, проведені у США, показують, що для більшості районів збільшення гідростатичного тиску становить 0,023 МПа на метр залягання пласта. Із збільшенням щільності гірських порід зменшується їх буримість. На буримість гірських порід впливає також і питома густина промивального розчину. Найвища

буримість буде тоді, коли вибій свердловини очищують повітрям. При переході із повітря на воду буримість погіршується. У випадку, коли промивку свердловини здійснюють глинистим розчином, буримість породи буде найнижчою.

При бурінні свердловини долотами з високостійким озброєнням, коли $K_v \rightarrow 0$ і $\varphi(t) \equiv 1$, як показує аналіз таблиць 2.2. – 2.4., єдиним показником оцінки буримості гірських порід може бути початкова швидкість буріння v_0 .

Якщо відбувається зношування долота, то такі показники як тривалість буріння фіксованого значення проходки t_ϕ , величина проходки за фіксований час h_ϕ , енергоємність буріння одиниці ствола E та питома енергія руйнування породи E_Π при постійних режимних параметрах і при бурінні в однорідних пластах є функціями не тільки v_0 , але й коефіцієнта K_v , який характеризує абразивні властивості гірської породи.

2.2. Моделювання розподілу розрізу свердловини на ділянки (пачки) однорідних за буримістю інтервалів порід

Розподіл стратегафічного розрізу на ділянки (пачки) однорідних за буримістю інтервалів порід має велике значення для вибору оптимальних режимів буріння, раціонального відпрацювання доліт і розробки інших технологічних заходів, які зв'язані з підвищенням швидкості буріння свердловини [39]. З метою удосконалення методу безконтактного контролю буримості гірських порід та подальших досліджень сформульовано визначення однорідного інтервалу порід або однорідної пачки порід, оскільки в залежності від конкретної постановки задачі в поняття «буримість» вкладається різний сенс [40,41] і сукупність параметрів, які характеризують пачку, вибирається тим чи іншим чином.

В роботі [40] ця задача охарактеризована двома суттєвими моментами: алгоритмом розбиття і критерієм якості розбиття. Слід зазначити, що під час розв'язання задачі розбиття розрізу на однорідні пачки порід питання про

якість розбиття і залежність кількості пачок від якості розбиття, як правило, в явному вигляді не розглядається [42].

Виходитиме з того, що свердловина має проектну глибину H і на глибині h буримість породи за розрізом характеризується деяким тезаурусом параметрів $\langle R \rangle$, які є функціями глибини свердловини

$$r_i = r_i(h); \quad r_i \in R; \quad i = 1, 2, \dots, N,$$

де N – кількість параметрів.

Тоді будемо вважати однорідним за буримістю такий інтервал глибин $(h^*, h^* + \Delta h^*)$, на якому вектор $\bar{r}(h)$ не суттєво відхиляється від середнього значення \bar{r} на цьому інтервалі свердловини

$$| \bar{r} - \bar{r}(h) | \leq \Delta r,$$

де $h \in [h^*, h^* + \Delta h^*]$;

$\Delta r > 0$ – допустима похибка розбиття розрізу на однорідні за буримістю ділянки.

Визначення похибки розбиття Δr є найбільш відповідальною задачею. Для її вирішення користуються методом суміщеного механічного каротажу [41]. Для цього графіки суміщених механічних каротажів окремих горизонтів з'єднують послідовно і отримують загальну картину суміщеного механічного каротажу за розрізом свердловини.

Аналіз отриманого графіка дозволяє встановити різке зменшення механічних швидкостей за розрізом свердловини і збільшення кількостей довбань у важко розбурюваних породах, а також різке збільшення механічних швидкостей і проходки на долото в легко розбурюваних пачках порід. Для розбивки порід на пачки за буримістю були прийняті встановлені практикою п'ять умовних найменувань міцності порід: м'які, середні, тверді, міцні і дуже міцні. Шляхом співставлення суміщеного механічного каротажу в кожному горизонті виділяють найбільш важко розбурювані пачки порід, в яких спостерігаються найменша механічна швидкість і проходка на долото. Цю пачку відносять до дуже міцних порід. В подальшому для цих порід міцність,

або опірність руйнування (буріння) приймалась за одиницю. Тоді пачки порід дуже міцні, міцні, тверді, середні, м'які будуть відноситися між собою за середнім значенням механічної швидкості буріння, приблизно як 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; і 4,0 (рис.2.1).

Враховуючи сказане, допустимі похибки розбиття розрізу на однорідні за буримістю ділянки мають бути в межах $\Delta r = 0,25 \div 0,33$ при переході долота із м'яких порід в породи середньої міцності та з твердих – в міцні $\Delta r_{\text{м.с.}} = 0,25$ $\Delta r_{\text{т.м.с.}} = 0,25$, а при переході із твердих в міцні та із середніх в тверді - $\Delta r_{\text{с.т.}} = 0,33$; $\Delta r_{\text{міц.дмі.}} = 0,33$.

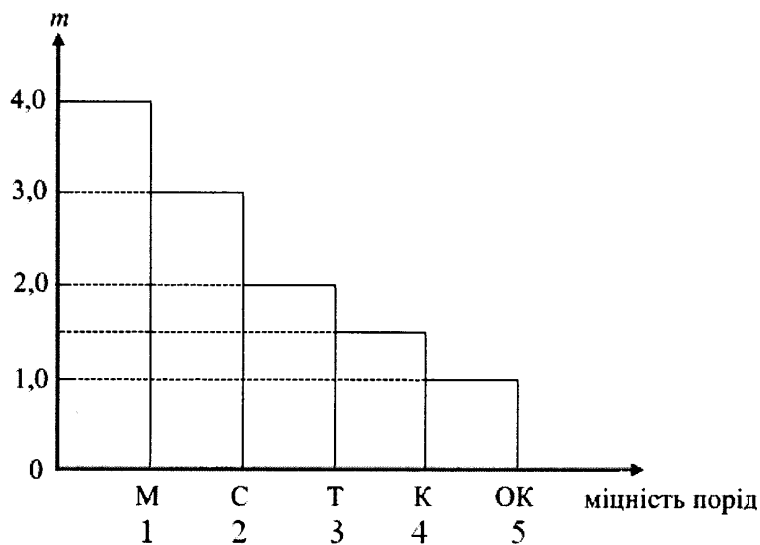


Рис. 2.1. Залежність кратності значень середньої механічної швидкості буріння по відношенню до середньої механічної швидкості буріння в дуже міцних породах від міцності порід:

- 1 – легка буримість;
- 2 – середня буримість;
- 3 – важка буримість;
- 4 – дуже важка буримість;
- 5 – винятково важка буримість.

Отже, якщо множину $\{r_i\}$ розглядати як сукупність параметрів, які характеризують будь-яке довбання, то як пачку порід можна вважати інтервал

глибин, який відповідає групі послідовних довбань взятих з того самого класу. Під класом будемо розуміти множину довбань з близькими коефіцієнтами r_i .

Слід відзначити, що точність опису буримості кожної пачки зростає із збільшенням кількості пачок, але при цьому пачки стають більш дрібними і в кінцевому результаті задача розбиття вироджується [40].

Тому в кожному окремому випадку існує деяке прийнятне сполучення допустимої похибки розбиття і кількості пачок. Причому завдання похибки розбиття визначає кількість пачок і навпаки. Проте, відокремлення пачок менше 2,5 м недоцільно [41] з практичної точки зору, оскільки це веде до незручностей при використанні їх під час буріння свердловини.

2.3. Вимоги до математичної моделі буримості гірських порід з позицій автоматизованого контролю

Оцінка властивостей гірських порід, які визначають ефективність руйнування при бурінні, є складним питанням, оскільки необхідно отримати переконливе обґрунтування, що вибраний критерій, який характеризує міцнісні властивості гірських порід з точки зору їх руйнування, має однозначний кореляційний зв'язок з тим, що не має точного формулювання, але є зрозумілим буровикам терміном – буримість породи [5].

Побудова подібних критеріїв і систем автоматизованого контролю, а також забезпечення ефективності їх функціонування залежать від вірогідності відтворення і оцінки адекватності математичної моделі технологічного процесу. Проте через характерні невизначеності неможливо побудувати детерміновану математичну модель, що враховує всі чинники, що впливають на процес руйнування породи. Це створює певні труднощі при розробці автоматизованих систем контролю буримості гірських порід.



Рис. 2.2. Класифікація методів інформаційного забезпечення керування процесом буріння свердловин на нафту і газ

Різні дослідники при вирішенні питання інформаційного забезпечення керування процесом буріння свердловин на нафту і газ звичайно віддають перевагу одному з чотирьох основних видів інформації (рис.2.2) про властивості гірських порід.

Результати аналізу літературних матеріалів [38,42,44] показують, що відомі методи формування однорідних за буримістю пластів гірських порід або непридатні для використання під час основного періоду роботи долота, або містять параметри, які неможливо вимірювати під час буріння свердловини, або мають недостатнє методичне обґрунтування. Тому сформульована задача потребує доробки, вдосконалення і подальшого розвитку, починаючи з обґрунтування показника буримості гірських порід і створення адекватної математичної моделі.

Субкомпонентом математичної моделі процесу буріння є рівняння роботи породоруйнівного інструменту, який працює в умовах суттєвої інформаційної невизначеності.

Перехід до конкретного виду рівнянь, що описують взаємодію породоруйнівного інструменту з породою вибою, еквівалентний встановленню

визначеності [6] у:

- складі і обсязі вихідної інформації, яка необхідна для прив'язки вибраних рівнянь до конкретних геолого-технічних умов буріння свердловини;
- виборі алгоритмів ідентифікації параметрів рівнянь в конкретних геолого-технічних умов розрізу;
- виборі методики визначення обмежень на режими експлуатації бурової техніки;
- виборі алгоритмів оптимізації цільової функції на множині режимів експлуатаційної техніки.

Але надмірне ускладнення структури рівнянь математичної моделі потребує таких вихідних даних, для отримання яких потрібна організація унікальних експериментів. Крім того ускладнюються ідентифікація рівнянь, збільшується час розрахунків на ЕОМ.

З іншого боку, надмірне спрощення математичної моделі веде до погіршення опису технологічного процесу і порушення якісних закономірностей цього опису.

Відомий цілий ряд досліджень в області вивчення закономірностей взаємодії долота з породою, що зв'язані з покращенням конструкції доліт [43], моделюванням їх роботи при проектуванні [44], а також прогнозуванням результатів роботи доліт для цілей оперативного керування роботою долота [33,34] при переході ним межі пластів.

На сьогодні для якісного виділення меж пластів, як правило, використовується механічна швидкість буріння v_m . У загальному вигляді модель механічної швидкості буріння може бути записана у формі, що запропонована Г.Д.Комбзом [45]

$$v_m = K v_0(F, n) \cdot \psi(\Gamma) \cdot \varphi(t) \cdot F(\Delta p), \quad (2.9)$$

де K - коефіцієнт буримості, який залежить від типу долота і породи, що розбурюється;

$v_0(F, n)$ - зв'язок початкової механічної швидкості буріння з параметрами

режиму буріння;

$\psi(\Gamma)$ - зв'язок початкової механічної швидкості буріння з гідромоніторним ефектом;

$\varphi(t)$ - функція зношення долота;

$F(\Delta p)$ - вплив диференційного тиску на вибої свердловини на механічну швидкість буріння.

Вітчизняними і зарубіжними дослідниками розроблені різноманітні моделі механічної швидкості буріння свердловини (рис.2.3), серед яких можна виділити наступні основні типи: диференційні моделі; векторно-матричні; статичні моделі, що відтворюють взаємозв'язки механічної швидкості буріння з параметрами процесу буріння; емпіричні рівняння взаємодії долота з породою при різних режимах буріння, що виявлені на основі стендових експериментів, і мультиплікативні моделі.

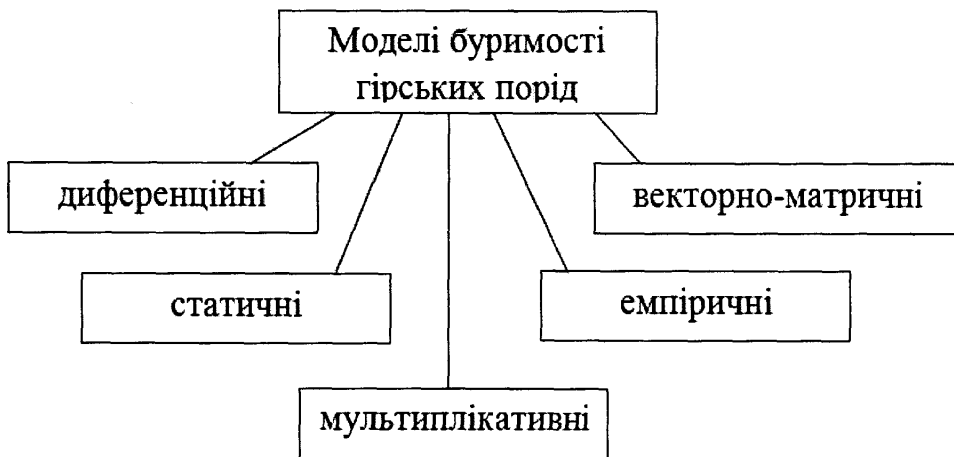


Рис. 2.4. Класифікація моделей буримості гірських порід

Повного математичного опису процесу буріння не існує, так як неможливо врахувати всі діючі на процес фактори [11]. Тому для оптимального управління процесом буріння свердловини використовуються, в основному, диференційні моделі поглиблення, які мають наступну структуру [10]:

$$v_m = dh/dt = f_1(F, n, \varphi(t)) = v_0(F, n)\varphi(t), \quad (2.10)$$

де: v_m - механічна швидкість буріння;

v_0 - початкова швидкість буріння;

h - проходка на долото;

F - осьова сила на долото;

n - швидкість обертання долота;

$\varphi(t)$ - функція відносного зносу озброєння долота.

Найбільш відомі математичні моделі приведені в таблиці 2.5.

Використовуються і інші моделі, але всі вони носять емпіричний характер, мають різну аналітичну структуру, містять різну структуру коефіцієнтів і тому придатні для роботи в вузькому діапазоні режимів буріння.

Деякі коефіцієнти моделей також є функціями умов і режимів буріння.

Таблиця 2.5

Математичні моделі механічної швидкості буріння

Автори	Математична модель	Параметри моделі
1	2	3
Е.М.Галле і Х.Б.Вудс (США)	$v_m = C_f \frac{F^{\alpha_f} r(n)}{a_f};$	C_f - буримість породи; α_f - показник степені, який залежить від властивостей породи; $r(n)$ - функція швидкості обертання долота; a_f - коефіцієнт зношення озброєння долота.
ВНДІКР нафта	$v_m = v_0 (F) \varphi_B$ $F = var, n = const,$	v_0 - початкова швидкість буріння; F - осьове навантаження на долото; φ_B - функція зносу долота; n - частота обертання долота.

Продовження табл.2.5

1	2	3
Г.Н.Семенов, М.І.Горбійчук	$v_M = \frac{K_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}}{F = var, n = var, \varepsilon(0) = 1.}$	<p>ε - оцінка відносного зносу озброєння долота; K_1, α_1, β_1 - коефіцієнти і показники степені, що залежать від типу долота і фізико-механічних властивостей гірських порід.</p>
ВНДІБТ	$v_M = \frac{a n^\alpha \bar{F}^2}{1 + (B \bar{F})^4} e^{-\beta n \bar{F}^2 t};$	<p>a, B, α, β - параметричні коефіцієнти; $\bar{F} = \frac{F}{D}$ - осьове навантаження відносно одиниці діаметра долота, кН/см.</p>
В.С.Федоров	$v_M = K_\delta \left(\frac{F}{d} \right)^x n^y \varepsilon(t);$	<p>K_δ - коефіцієнт буримості порід; $\varepsilon(t)$ - функція зносу долота; x, y - емпіричні коефіцієнти.</p>
В.П.Миронов і Б.И.Шхинек	$v_M = v_0 e^{-\alpha t} + \theta(t);$	<p>$\theta(t)$ - випадкова складова з нульовим математичним сподіванням.</p>
Э.Х.Сабитов та ін.	$f_i = f_i(\bar{\rho}, \bar{x}, \bar{u}), i = \bar{1}, \bar{l}$ $h(F, n, t) = h_n(F, n) \cdot [1 - \exp(-\beta_u)(F, n)t]$ $h_n(F, n) = a_1 F^{a_2} n^{a_3}$ $\beta_u(F, n) = \nu_1 F^{\nu_2} n^{\nu_3}$ $M_y = const$	<p>$\bar{\rho}$ - вектор режимів буріння розмірності l; \bar{x} - вектор коефіцієнтів розмірності m; \bar{u} - вектор вибійних умов; h_n - гранична проходка на долото; β_u - показник інтенсивності зносу озброєння долота; M_y - середній питомий момент на долоті; $a_1, a_2, a_3, \nu_1, \nu_2, \nu_3$ - параметричні коефіцієнти</p>

Продовження табл.2.5

1	2	3
М.А.Мислюк, О.В.Лужаниця	$V_m = K_0 \exp[K_1 \Delta p + K_2 \sqrt{L}]$ $\times \left(\frac{P}{d}\right)^x n^y \varepsilon(t)$	K_0, K_1, K_2, K_3 - коефіцієнти рівнянь моделей; Δp - поровий тиск; L - довжина свердловини; x, y - емпіричні коефіцієнти; $\varepsilon(t)$ - функція зносу долота.

В рівняннях для механічної швидкості буріння, як правило, не враховується вплив витрати промивної рідини на механічну швидкість буріння. Відсутність витрати промивної рідини в моделях різні автори пояснюють введенням обмежень знизу на швидкість витікання з насадок долота, питому витрату на одиницю площі вибою і обмежень зверху на величину диференційного тиску і вважають, що всередині обмежень витрата промивної рідини практично не впливає на механічну швидкість буріння. Це зумовлено, з одного боку, відсутністю моделі, яка враховує вплив реології, а з іншого – необхідністю вимірювання і врахування для ідентифікації великої кількості параметрів. Дійсно, для ідентифікації показника буримості за даними [6] треба не менше 30 вимірювань вихідних параметрів в кожному довбані. Реалізація таких вимірювань можлива лише в автоматичному режимі з використанням спеціальних систем збору і обробки інформації на буровій.

Крім того, рівняння, що описують роботу долота, повинні бути прив'язані до конкретних умов буріння і відповідати вимогам до математичної моделі буримості з позицій системного підходу і автоматизованого контролю [46]:

- модель буримості повинна бути адекватною досліджуваному об'єкту з точністю, яка необхідна для оцінки буримості гірських порід в реальному часі;
- математичну модель необхідно отримати для деякого достатньо великого інтервалу глибин (пачки порід) і вона повинна бути інформативною;
- рівняння моделі повинні всебічно і непротивичиво відображати систему операцій необхідних для експериментального визначення буримості гірських

порід і для перевірки ступеня відповідності математичної моделі фізичної реальності;

- в математичній моделі повинні виконуватися умови збереження розмірності;

- математична модель повинна бути достатньо простою і добре відображати якісний характер процесу, а також досвід і інтуїцію технологів – експертів, дозволяти здійснювати ідентифікацію буримості гірських порід за поточними результатами буріння, та повинна бути прив’язана до деякої групи вибійних умов;

- фактори, що не відображаються математичною моделлю, повинні враховуватися як обмеження або бути сталими, наприклад, витрата бурового розчину $Q = \text{const}$;

- ідентифікація параметрів математичної моделі повинна здійснюватися з використанням оперативних даних без проведення унікальних експериментів;

- реалізація моделі повинна здійснюватися у режимі реального часу при заданій пам’яті комп’ютера;

- з позиції системного підходу математична модель буримості гірських порід повинна мати певну точність і область застосування;

- математична модель повинна задовольняти умови стійкості і коректності за Ж. Адамаром і умову фізичної реалізованості.

Вважається, що задача поставлена коректно, якщо виконуються одночасно три умови Ж. Адамара: існування розв’язку задачі; розв’язок повинен бути єдиним і неперервно залежати від початкових і граничних умов (малим змінам початкових даних при $t = 0$ відповідають малі зміни рішення системи рівнянь при $t > 0$ (в обмеженій області зміни t)).

Отже виходячи із сучасного стану в області математичного моделювання процесу буріння, і розвитку методів контролю і керування впливає, що для визначення буримості гірських порід в реальному часі з використанням засобів

автоматизованого контролю зручно і необхідно створювати математичну модель у диференційній формі.

2.4. Розроблення структури моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта контролю буримості гірських порід

У зв'язку з тим, що процес руйнування породи буровим долотом відбувається одночасно із зношенням долота, розглядатимемо сукупність «долото – порода» як єдиний об'єкт контролю.

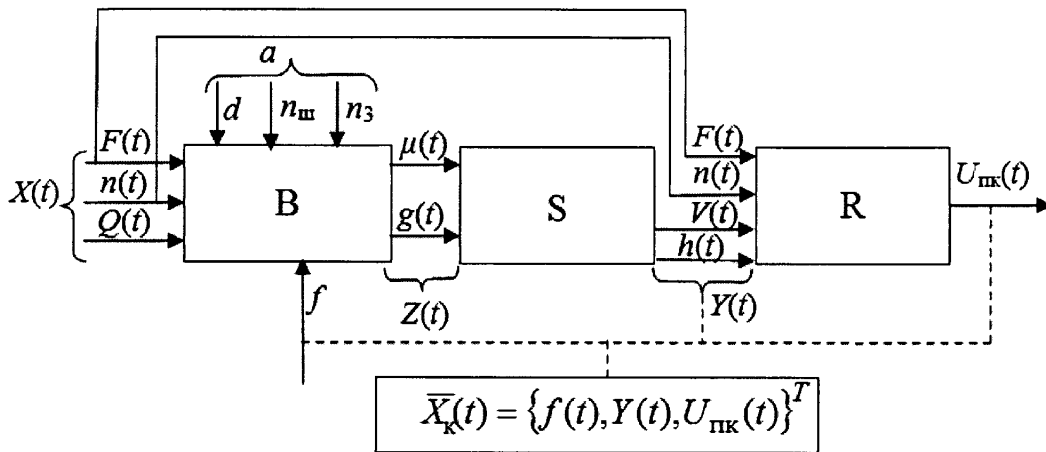


Рис. 2.5. Структурна схема процесу буріння свердловин як об'єкта контролю буримості в просторових координатах : $\bar{X}_k(t)$ - контрольовані параметри

Стан об'єкта контролю будемо характеризувати параметрами, які визначають зношення озброєння і опор долота

$$\bar{Z}^T(t) = [\mu(t), g(t)],$$

де t – поточний час основного періоду роботи долота, який вимірюється від початку рейсу долота;

$\mu(t), g(t)$ - оцінки зносу озброєння і опор долота, а також оцінкою міцності гірських порід, якою обрали такий показник як буримість порід f .

Процес функціонування об'єкта контролю будемо розглядати як послідовну зміну його станів. При переході від одного миттєвого стану до

іншого значення $\mu(t), g(t)$ в загальному випадку змінюються. Оскільки гірська порода і долото зазнають впливу різноманітних зовнішніх факторів, але далеко не всі вони суттєві, то з множини зовнішніх впливів, які діють на об'єкт контролю, вибрані лише ті, що суттєво впливають на ефективність руйнування породи: вхідні керувальні дії

$$\bar{X}^T(t) = [F(t), n(t), Q(t)] \quad (2.11)$$

і апріорі відомі параметри долота

$$\bar{\alpha}^T = [d, n_{\text{ш}}, n_3], \quad (2.12)$$

де: F – осьова сила на долото;

n – швидкість обертання долота;

$Q(t)$ – витрата промивного розчину;

d – діаметр долота;

$n_{\text{ш}}$ – кількість шарошок;

n_3 – кількість зубців на шарошках.

Параметри стану долота $Z_i(t)$ пов'язані з керувальними впливами $\bar{X}(t)$, параметрами долота $\bar{\alpha}_i$ і буримістю порід f залежністю

$$Z_i(t) = B_i[\bar{X}(t), \alpha_i, f] \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

де n – кількість доліт.

Вплив стану об'єкта контролю на показники процесу буріння характеризується значеннями його вихідних величин \bar{Y}^T , проходки долота $h(t)$ і механічної швидкості буріння $v(t)$, тобто

$$\bar{Y}^T(t) = \{h(t), v(t)\}. \quad (2.13)$$

Кожна з вихідних величин визначається через параметри стану $\bar{Z}(t)$ своєю функціональною залежністю

$$Y_j = S_j[\bar{Z}(t)], \quad j = 1, 2. \quad (2.14)$$

Параметри контролю визначаються через вектори і вихідні величини об'єкта $U_{\text{пк}}^{(l)} = R_l(\bar{X}(t), \bar{U}(t), t), l = 1, \dots, 4.$

Для обґрунтування вибору контрольованих величин визначили клас задач контролю буримості гірських порід і в зв'язку з тим, що процес поглиблення свердловин є нестационарним випадковим процесом, що розвивається в часі, і між точками простору параметрів стану Z і простору спостережень Y немає однозначної відповідності, цей варіант контролю відповідає визначенню подій в умовах невизначеності [47]. Основним джерелом невизначеності є змінні властивості гірських порід і технічного стану долота, спосіб контролю основних інформативних параметрів та інше.

Враховуючи сказане, бачимо, що показник буримості гірських порід, який піддається безконтактному контролю, може бути визначено на базі комплексу контрольованих параметрів

$$f = M(\bar{Y}(t), \bar{X}(t)). \quad (2.15)$$

До складу залежності (2.15) входять керувальні впливи і показники процесу поглиблення свердловин.

Попередній вибір найбільш суттєвих параметрів, що входять в функціонал (2.15), є неформальним. Крім того, розглянуті параметри не мають чіткого зв'язку з параметром буримості K_f . Тому на наступному етапі досліджень необхідно скорегувати обсяг контролю з урахуванням методів контролю окремих величин, їх точності і вірогідності.

2.5. Розроблення узагальненої математичної моделі буримості гірських порід в просторі станів

Враховуватимемо, що долота, які застосовуються в технологічному процесі і впливають на його ефективність, одночасно є носіями інформації не тільки про сам процес, але і про середовище, в якому цей процес відбувається, а саме, про властивості гірських порід, промивальної рідини та ін. У багатьох випадках долото в свердловині зустрічає на своєму шляху породи різної буримості, внаслідок чого виникають надмірні перевантаження, що веде до зміни динамічних параметрів об'єкта.

Проте оскільки апріорі визначити буримість породи неможливо, тому доцільною є розроблення математичної моделі для визначення буримості гірських порід шляхом вимірювання параметрів і показників процесу буріння, тобто безконтактним методом.

З позицій системного аналізу об'єкт і задачі визначення буримості гірських порід, які безпосередньо зв'язані із збором, збереженням і відображенням інформації про досліджуваний об'єкт в процесі поглиблення свердловини, можна віднести до інформаційних моделей і задач [47,48].

Формально на виході такої інформаційної моделі створюється потік інформації Y_2 :

$$Y_2 = (Y_1 \oplus Y'_1) \oplus Y_3, \quad (2.16)$$

де: Y_1 - потік інформації про параметри режиму буріння;

Y'_1 - потік інформації про показники процесу буріння;

Y_3 - знання і дані про предметну область.

Вони є основними знаннями для моделювання і містяться у базі знань (БЗ), що забезпечують отримання нових знань.

Інформаційну модель підтримує інформаційна система ІС, яка розв'язує інформаційну задачу визначення буримості гірських порід.

Структура взаємодії інформаційної системи (ІС) з контрольованим об'єктом (КО) і базою знань (БЗ) зображена на рис.2.6.

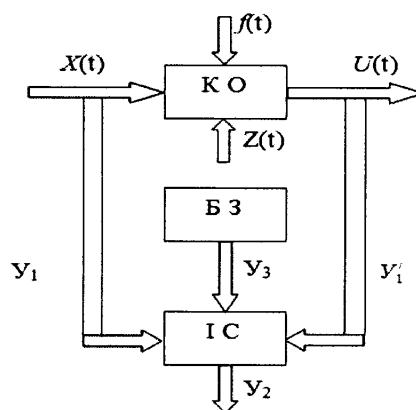


Рис. 2.6. Структура взаємодії інформаційної системи ІС з контрольованим об'єктом КО

Як бачимо з рис.2.6, контрольований об'єкт КО має чотири групи змінних, які характеризують процес поглиблення свердловин [49].

До першої групи змінних $\bar{X}(t)$, тобто вектора вхідних керувальних дій, відносять: осьову силу $F(t)$ на долото, частоту обертання долота $n(t)$, кількість $Q(t)$ і технологічні показники (густина, в'язкість, водневий показник РН та ін.) промивної рідини, час t_s роботи долота на вибої свердловини.

Другу групу складають некеровані параметри $Z(t)$, які не залежать від режиму буріння (типорозмір долота), глибина свердловини, параметри бурової установки і бурильної колони та інші). Вони характеризують умови протікання технологічного процесу поглиблення свердловини.

До третьої групи відносять показники процесу буріння $U(t)$, які залежать від вхідних параметрів: проходку $h(t)$, механічну швидкість буріння $v(t)$, рейсову швидкість буріння $v_p(t)$, собівартість метра проходки $\beta_c(t)$ та інші.

Четверту групу складають збурюючі впливи $f(t)$: твердість $T(t)$, буримість $B(t)$, абразивність $A(t)$, суцільність $C(t)$, пластичність гірських порід $\Pi(t)$, пластові тиски, сила статичного опору тертя колони бурильних труб об стінки свердловини та ін.:

$$f(t) = f(T(t), A(t), B(t), C(t), \Pi(t)). \quad (2.17)$$

У подальшому параметри режиму буріння $F(t), n(t), Q(t)$ будемо вважати компонентами вектора вхідних керувальних дій

$$\bar{X}(t) = [F(t), n(t), Q(t)]^T, \quad (2.18)$$

показники процесу буріння будемо вважати компонентами вектора вихідних змінних

$$\bar{Y}(t) = [h(t), v(t), v_p(t), \beta_c(t)]^T, \quad (2.19)$$

де t – поточний час буріння, який вимірюють від початку рейсу долота.

Глибокий аналіз показників буримості гірських порід довів, що в більшості ситуацій цю характеристику гірських порід оцінюють, користуючись інформацією про механічну швидкість буріння v_0 .

Це дозволяє при незмінному векторі керувальних дій (2.18) математичну модель механічної швидкості буріння (буримості гірських порід) подати у вигляді

$$v(t) = \phi[\bar{X}(t), B(t), A(t)], \quad (2.20)$$

де $B(t)$, $A(t)$ – параметри, що характеризують геолого-технологічні умови буріння.

Об'єкт дослідження представити у вигляді перетворювача сигналів $X(t)$ і $f(t)$ в вихідний сигнал $U(t)$ (рис.2.7)

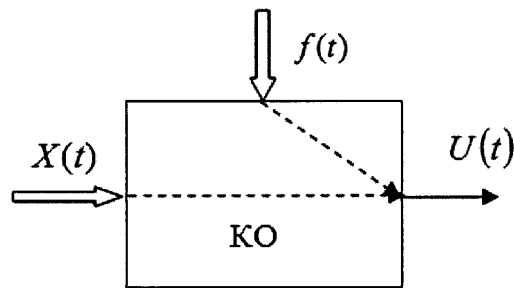


Рис. 2.7. Зв'язки між вхідними $X(t)$, $f(t)$ і вихідними $U(t)$ змінними контрольованого об'єкта КО

Тепер розглянемо всі інформаційні потоки.

Знання Y_3 мають дві складові: Y_3^* - знання про предметну область (геолого-технічний наряд, режимно-технологічна карта та ін.), Y_3^{**} - знання, які необхідні для отримання нових знань про об'єкт досліджень КО тобто про буримість породи.

Виходячи з цього, співвідношення (2.16) можна записати у такому вигляді

$$Y_2 = (Y_1 \oplus Y_1') \oplus Y_3^* \oplus Y_3^{**}, \quad (2.21)$$

де $(Y_1 \oplus Y_1') \oplus Y_3^*$ - оператор, який практично визначає модель Q контрольованого об'єкта;

Y_3^{**} - процедура отримання необхідних значень відносно досліджуваного об'єкта. Отже, для визначення буримості породи $B(t)$ і прийняття рішення при

управлінні технологічним процесом поглиблення свердловини потрібна інформація Y_2 , яка містить модель самого об'єкта і інформацію про процедуру прийняття рішення Y_3^{**} (критерії, умови, пріоритети та ін.) на основі інформації входу і виходу об'єкта, тобто: Y_3^{**} визначається на основі $Y_1(U(t))$ і на основі $Y'(X(t))$. Для визначення моделі об'єкта контролю, тобто структури функції (2.20) скористаємось результатами роботи [49]. Аналіз умов буріння дозволяє прийти до висновку, що основними технологічними параметрами, від яких залежить ця функція є осьова сила на долото F , швидкість обертання долота n , потужність приводу долота P , витрата промивальної рідини Q , діаметр долота d і тип його оснащення.

Оскільки тип оснащення долота – дискретний параметр, то його можна включити в умови використання математичної моделі.

Додатковий аналіз технології буріння нафтових і газових свердловин дозволяє сформулювати ще одне твердження: якщо витрата промивальної рідини Q , віднесена до об'єму вибуреної за одиницю часу породи, перевищує деяку критичну величину, що характеризує повноту очистки вибою свердловини, то впливом промивальної рідини на досліджувану функцію (початкове значення механічної швидкості буріння v_0) можна знехтувати. Отже, після введення додаткових умов використання математичної моделі, що містять тип оснащення долота і обмеження на мінімально допустиму витрату рідини Q , одержимо, що вихідна функція v_0 залежить від F, n, P, d .

Між всіма цими величинами існує деяка функціональна залежність, яку можна записати у вигляді рівності

$$\varphi(v_0, F, n, P, d) = 0, \quad (2.22)$$

де v_0, F, n, P, d – числові значення відповідних величин при деякому вибраному наборі основних одиниць фізичних величин.

Для розкриття цієї залежності перейдемо від початкових розмірних координат до безрозмірних змінних [50]. Оскільки осьова сила F на долото і потужність P на долоті є векторними величинами, то, введемо систему

координат x, y, z , в якій вісь z направлена вздовж стовбура свердловини, а площина $xу$ – перпендикулярно до стовбура свердловини. Тоді розмірності досліджуваних змінних в цій системі координат будуть такими

$$[\nu_0] = \frac{L_z}{T}; [F] = \frac{mL_z}{T^2}; [n] = \frac{1}{T}; [P] = \frac{mL_xL_y}{T^3}; [d] = (L_xL_y)^{0,5}, \quad (2.23)$$

де L_x, L_y, L_z - розмірності довжини по координатах x, y, z відповідно;
 m, T - розмірності маси і часу.

Із показників розмірностей (2.23) складемо зведену табл.2.2.

Таблиця 2.6

Підсумкова таблиця показників розмірностей досліджуваних змінних

Параметри	L_x	L_y	L_z	m	T
ν_0			1		-1
F			1	1	-2
n					-1
P	1	1		1	-3
d	0,5	0,5			
$\frac{P}{D^2}$				-1	-3
$\frac{F}{\nu_0}$				1	-1
$\frac{P\nu_0}{D^2F}$					-2

Після послідовного вилучення незалежних в системі СІ розмірностей довжини, маси і часу скористались π -теоремою Букінгема [50] і одержали одну безрозмірну комбінацію, від якої залежить остаточний розв'язок задачі:

$$\left(\frac{\nu_0 P}{Fn^2 d^2} \right) = C = \text{const} . \quad (2.24)$$

Розв'язуючи рівняння (2.24) відносно ν_0 , одержимо

$$\nu_0 = C \frac{Fn^2 d^2}{P}, \quad (2.25)$$

де C - невідома величина, яка повинна визначатись як результат ідентифікації.

В рівнянні (2.25) потужність P на долоті, що витрачається на руйнування породи вибою свердловини, залежить від осьової сили на долото F і швидкості обертання долота n , причому ця залежність визначається не тільки властивостями гірських порід, але й механічною характеристикою приводу долота

$$n = f(M),$$

де M – момент на долоті.

З врахуванням цього можна записати [8]

$$P = C_p F^\gamma \cdot n^\delta, \quad (2.26)$$

де γ, δ – невідомі показники степеня, що підлягають ідентифікації;

C_p – коефіцієнт, який враховує розмірність потужності.

Підставляючи (2.26) в (2.25), одержимо

$$v_0 = C_p \frac{Fn^2 D^2}{F^\gamma \cdot n^\delta} = C_p d^2 F^{1-\gamma} n^{2-\delta}, \quad (2.27)$$

або

$$v_0 = K_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (2.28)$$

де $K_1 = CD^2 \frac{1}{C_p}$, $\alpha_1 = 1 - \gamma$, $\beta_1 = 2 - \delta$.

Права частина математичної моделі (2.28) є функцією керувальних дій і її коефіцієнти підлягають ідентифікації в процесі буріння. Параметрична ідентифікація повинна здійснюватись при переході долота в породи з іншою буримістю і цей момент повинен бути виявлений за допомогою математичної моделі буримості гірських порід.

Це означає, що статична модель (2.25) придатна лише в конкретних умовах експерименту з обмеженим діапазоном зміни параметрів режиму буріння.

Величини F, n , що входять в математичну моделі (2.28) є випадковими функціями часу. Допускаємо, що у межах одного рейсу вони є ергодичними і стаціонарними.

Для визначення постійної складової у величинах F , n введемо до розгляду базові величини n_0 , F_0 .

Тоді:

$$\begin{aligned} n(t) &= n_0 + n_-(t), \\ F(t) &= F_0 + F_-(t), \end{aligned} \quad (2.29)$$

де $n_-(t)$, $F_-(t)$, – стаціонарні в межах рейсу долота ергодичні, випадкові процеси з нульовим математичним сподіванням.

Базові величини n_0 , F_0 , вибираємо довільно, причому це не обов'язково повинні бути середні значення n , F , або оптимальні. Важливим є лише те, що їх призначили постійними і їх величини відомі.

Значення $F(t)$ і $n(t)$, яке виражається формулою (2.29) підставимо у (2.28). У результаті отримаємо

$$v_0 = K(F_0 + F_-(t))^\alpha \cdot (n_0 + n_-(t))^\beta. \quad (2.30)$$

Будемо вважати, що значення $F_-(t)$ і $n_-(t)$, які породжені процесом вимірювання такі, що при розкладі правої частини рівняння (2.30) у ряд Тейлора можна обмежитись лише лінійними членами ряду.

Позначимо

$$f_F(F, n) = (F_0 + F_-(t))^\alpha \cdot (n_0 + n_-(t))^\beta. \quad (2.31)$$

Тоді

$$f_F(F, n) \approx f_F(F_0, n_0) + \frac{\partial f_F(F_0, n_0)}{\partial F} F_-(t) + \frac{\partial f_F(F_0, n_0)}{\partial n} n_-(t),$$

або з врахуванням (2.31)

$$f_F(F, n) \approx F_0^\alpha n_0^\beta + \alpha F_0^{\alpha-1} n_0^\beta F_-(t) + \beta F_0^\alpha n_0^{\beta-1} n_-(t) = F_0^\alpha n_0^\beta \left(1 + \alpha \frac{F_-(t)}{F_0} + \beta \frac{n_-(t)}{n_0} \right).$$

Підставляючи значення $f_F(F, n)$ у (2.30), отримуємо

$$v_0 = K F_0^\alpha n_0^\beta \left(1 + \alpha \frac{F_-(t)}{F_0} + \beta \frac{n_-(t)}{n_0} \right).$$

Величина $\hat{v}_0 = KF_0^\alpha n_0^\beta$ - це швидкість буріння, яка віднесена до вибою свердловини за умови, що осьове навантаження на долото вимірюється без похибок. Отже,

$$\frac{v_0}{\hat{v}_0} = 1 + \alpha \frac{F_-(t)}{F_0} + \beta \frac{n_-(t)}{n_0}. \quad (2.32)$$

Знайдемо математичне сподівання і дисперсію випадкової величини $\frac{v_0}{\hat{v}_0}$.

Оскільки $M[F_-(t)] = 0$ і $M[n_-(t)] = 0$, то $M\left[\frac{v_0}{\hat{v}_0}\right] = 1$

і відповідно

$$M\left[\left(\frac{v_0}{\hat{v}_0} - 1\right)^2\right] = M\left[\left(\frac{v_0}{\hat{v}_0}\right)^2\right] - 1.$$

Якщо допустити, що випадкові величини $F_-(t)$ і $n_-(t)$ некорельовані, то отримаємо

$$\sigma_{\frac{v_0}{\hat{v}_0}}^2 = M\left[\left(\frac{v_0}{\hat{v}_0} - 1\right)^2\right] = \alpha^2 \left(\frac{\sigma_F^2}{F_0}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\sigma_n^2}{n_0}\right)^2, \quad (2.33)$$

де σ_F^2 і σ_n^2 - дисперсій випадкових величин $F_-(t)$ і $n_-(t)$.

Якщо буріння ведеться в однорідному пласті і при постійних режимних параметрах, то $\hat{v}_0 = const$.

З врахуванням раніше зроблених допущень, будемо мати

$$M[v_0] = \hat{v}_0,$$

$$\sigma_{v_0}^2 = \frac{1}{\hat{v}_0^2} \left(\alpha^2 \left(\frac{\sigma_F}{F_0}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\sigma_n}{n_0}\right)^2 \right).$$

Таким чином, початкова швидкість буріння в середньому наближається до її дійсного значення, а дисперсія v_0 залежить від співвідношення σ_F / F_0 і σ_n / n_0 .

Бачимо, що буримість гірських порід визначає величину добутку $F_0 \cdot n_0$ і, що для кожної породи існує певне оптимальне значення добутку $F_0 \cdot n_0$ для досягнення високих показників роботи долота.

Визначення раціонального сполучення осьової сили на долото F і швидкості його обертання n для конкретної гірської породи, як відомо, є найбільш важливою задачею оптимізації процесу буріння

Отже, розроблена математична модель буримості гірських порід містить параметри, які піддаються вимірюванню в реальному часі, що дозволить визначити цю характеристику гірських порід безконтактним методом. При цьому головною задачею є вибір базової механічної швидкості буріння.

2.6. Розроблення динамічної інформаційної моделі буримості гірських порід в умовах дрейфу

Для вирішення задачі автоматизованого контролю буримості гірських порід потрібна математична модель процесу буріння у просторі станів. Стан об'єкта контролю характеризується проходкою долота $h(t)$, станом озброєння долота та опор шарошок. Проте прямому вимірюванню доступна лише проходка долота, тоді як стан озброєння долота і опор шарошок можна оцінити лише опосередковано за механічною швидкістю буріння v і моментом на долоті M_d [51].

Математичну модель буримості гірських порід будемо розглядати при таких допущеннях:

- буріння пошуково-розвідувальних або опорно-технологічних свердловин ведеться найбільш поширеним в Україні роторним способом так, що керувальні впливи – осьова сила на долото F і швидкість його обертання n – взаємо на залежні;

- поглиблення свердловини здійснюється не тільки традиційними трьохшарошковими долотами, але й долотами нового покоління – полікристалевими типу PDC і трьохшарошковими, які забезпечують проходку на долото декілька тисяч метрів;

- вся глибина свердловини має бути розбита на однорідні за буримістю інтервали (пачки) порід, в середині яких фізико-механічні властивості гірських порід постійні.

Відомі математичні моделі містять невимірювані параметри, мають вузьку область застосування, що є їх недоліками.

З огляду на проведений аналіз і сформульовані допущення початкову механічну швидкість проходки будемо оцінювати за допомогою статичної математичної моделі:

$$v_0 = k_1 F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1}, \quad (2.34)$$

де: v_0 – механічна швидкість під час буріння незатупленим долотом;

F_0 – осьова сила на долото під час буріння незатупленим долотом;

n_0 – швидкість обертання долота під час буріння незатупленим долотом;

k_1, α_1, β_1 – параметри математичної моделі, які підлягають ідентифікації.

Рівняння (2.34) використовується більшістю дослідників [10]. Однак значення коефіцієнтів k_1, α_1, β_1 у всіх випадках різні, що пояснюється різними умовами проведення експериментів.

Відомо [34,44,49], що тільки поточне значення механічної швидкості буріння може бути використане для оперативної оцінки фізико-механічних властивостей гірських порід, ефективності процесу буріння і вибору оптимальних керувальних впливів. Усі інші чинники можуть бути визначені лише після завершення рейсу долота, тобто з великим запізненням в часі, протягом якого умови буріння можуть суттєво змінитися. Внаслідок цього робоча інформація про фактично досягнуті рівні цих величин втрачає свою практичну цінність для системи автоматичного керування.

Проте, механічна швидкість буріння v_0 достатньо ефективно і повно дозволяє оцінювати процес буріння і буримість гірських порід лише алмазними долотами типу PDC і шарошковими долотами нового покоління, які забезпечують проходку на долото декілька тисяч метрів. На даний час, починаючи з 2003 року широко застосовується алмазні долота БИТ 214,3 М5 в

компоновці з гвинтовими двигунами і телесистемами при бурінні похило-спрямованих і горизонтальних свердловин в інтервалі 800-2300 м. Середня проходка на таке долото складає більше 2000м. Відомі [51] також сучасні породоруйнівні інструменти ЗАТ «НДІ КБ бурового інструменту», оснащені алмазними композиційними матеріалами (бурові долота АП-123 МС, АП-214,3 МС, Д2Ц-138/90 МС) та твердосплавними вставками (лопатеві бурові долота ЗЛ-85 МС, Л-112 МС, Л-151 МС. 2Л-120,6 МС, 3Л-120,6 МС, 4Л-120,6 МС, 3Л-295,3 МС); шарошкові долота І 215,9 МСЗ-ГВР1; ІІ 215,9 МСЗ-ДРШ; ІІІ 215,9 МСЗ-ГАУ, ІІІ-295,3 МСЗГАУ.

Слід відзначити, що на відміну від доліт PDC і шарошкових доліт нового покоління, при бурінні традиційними долотами, які забезпечують проходку на долото на родовищах України, в середньому 38,4 м [3] при бурінні м'яких та м'яких з пропластками середніх за твердістю малоабразивних порід, для оцінки ефективності процесу потрібен інший показник, рівень якого залежить не тільки від буримості і абразивності гірської породи, але й від зносостійкості озброєння шарошкового долота.

Для оцінки впливу зносу озброєння шарошкового долота на механічну швидкість буріння скористаємося рівнянням (2.34) для механічної швидкості буріння незатупленим долотом. Для цього потужність роторного механізму бурової установки виразимо через механічну швидкість буріння і питомі енерговитрати у такому вигляді:

при бурінні незатупленим буровим долотом

$$F_0^\alpha n_0^\beta = \left(\frac{1}{k_1}\right)_0 v_0, \quad (2.35)$$

при бурінні затупленим буровим долотом

$$F^\alpha n^\beta = \left(\frac{1}{k}\right)_v, \quad (2.36)$$

де v – механічна швидкість при бурінні затупленим долотом;

$\left(\frac{1}{k}\right)_0, \left(\frac{1}{k}\right)$ - питомі енерговитрати при бурінні незатупленим і затупленим долотом.

Взявши відношення (2.36) до (2.35), отримаємо

$$\frac{F_1^{\alpha_1 n_1 \beta_1}}{F_0^{\alpha_1 n_0 \beta_1}} = \frac{\left(\frac{1}{k_1}\right)_v}{\left(\frac{1}{k_1}\right)_{v_0}}. \quad (2.37)$$

Виходитимемо з того, що буріння ведеться з постійною потужністю, тобто $F_1^{\alpha_1 n_1 \beta_1} = F_0^{\alpha_1 n_0 \beta_1}$. Тоді із (2.37) маємо

$$\frac{\left(\frac{1}{k_1}\right)_{v_0}}{\left(\frac{1}{k}\right)_v} = \frac{v_0}{\varphi(t)}, \quad (2.38)$$

де $\varphi(t) = \frac{w}{w_0}$ - функція зносу озброєння шарошкового долота.

Показник $\varphi(t)$ - являє собою відношення поточних питомих енерговитрат w до питомих енерговитрат при бурінні незатупленим долотом. Як видно з рівняння (2.38), цей показник може бути визначений і як відношення механічної швидкості буріння v_0 незатупленим долотом до поточного значення механічної швидкості v , тобто

$$\varphi(t) = v_0 v^{-1}. \quad (2.39)$$

Значення $\varphi(t)$ може приймати неперервний ряд значень від $\varphi(t) = 1$ до $\varphi(t) = \infty$. При цьому $\varphi(t) = 1$ відповідає фізичний знос озброєння долота рівний нулю, а $\varphi(t) = \infty$ - повний знос озброєння.

Швидкість зношення озброєння шарошкового долота пропорційна швидкості зростання питомих енерговитрат

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = w_0^{-1} \frac{dw}{dt}; \quad (2.40)$$

або швидкості падіння механічної швидкості буріння

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = v_0 \frac{d(v^{-1})}{dt}. \quad (2.41)$$

Ступінь зношення озброєння шарошкового долота можна оцінити також за темпом падіння механічної швидкості буріння, який у [54] названий умовним зносом:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{v_t} = \frac{\varphi(t)}{v_0}. \quad (2.42)$$

Показник ε_y в процесі поглиблення свердловини приймає значення від $\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} = \frac{1}{v_0}$ до $\varepsilon_y = \infty$ при $v \rightarrow 0$. Похідна від цього показника з урахуванням (2.42) дорівнює

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{d(v_t^{-1})}{dt} = \frac{d\varphi(t)}{v_0}. \quad (2.43)$$

Якщо врахувати значення $\varphi(t)$, які наведені в табл.2.1, то можна визначити величини ε_y , $d\varphi/dt$, $d\varepsilon_y/dt$ (табл. 2.7).

Як показує аналіз табл.2.7, якщо механічна швидкість буріння змінюється за гіперболічним законом, тобто $\varphi(t) = 1 + K_\varepsilon t$, тоді за показником $K'_\varepsilon = \frac{d\varphi(t)}{dt}$ можна оцінювати абразивність гірських порід. Величину $\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{K_\varepsilon}{v_0}$ позначимо як

$$K_y = \frac{K_\varepsilon}{v_0}.$$

Таблиця 2.7

Значення величин ε_y , $d\varphi/dt$, $d\varepsilon_y/dt$

Значення m	$\varepsilon_y = \frac{\varphi(t)}{v_0}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	$d\varepsilon_y/dt$
0	$\frac{1}{v_0} \cdot \frac{1}{1 - K_R t}$	$\frac{K_R}{(1 - K_R t)^2} \cdot \frac{1}{v_0}$	$\frac{K_R}{(1 - K_R t)^2}$
1	$\frac{e^{K_v t}}{v_0}$	$\frac{K_v}{v_0} e^{K_v t}$	$K_v e^{K_v t}$

Продовження табл. 2.7

Значення m	$\varepsilon_y = \frac{\varphi(t)}{v_0}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	$d\varepsilon_y / dt$
2	$\frac{1}{v_0} \cdot (1 + K_\varepsilon t)$	$\frac{K_\varepsilon}{v_0}$	K_ε
3	$\frac{1}{v_0} \cdot \sqrt{1 + K_q t}$	$\frac{K_q}{v_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + K_q t}}$	$\frac{K_q}{2 \cdot \sqrt{1 + K_\varepsilon t}}$

З точки зору оцінки ефективності процесу поглиблення свердловин заслуговує уваги похідна відносного зносу озброєння долота ε по проходці долота h , тобто інтенсивність відносного зносу озброєння долота, яка для гіперболічної моделі швидкості проходки набуде такого значення:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = \frac{\frac{d\varepsilon}{dt}}{\frac{dh}{dt}} = \frac{K_\varepsilon}{v}, \quad (2.44)$$

або

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = \frac{K_\varepsilon}{v_0} \varepsilon = K_y \varepsilon, \quad (2.45)$$

Як бачимо з наведених формул (2.4) і (2.45), величина похідної $\frac{d\varepsilon}{dh}$ пропорційна швидкості зміни відносного зносу бурового долота K_ε і обернено пропорційна механічній швидкості буріння. По мірі збільшення відносного зносу долота похідна $\frac{d\varepsilon}{dh}$ зростає.

На початку рейсу долота, коли озброєння долота ще не затуплене, $\varepsilon = 1$ в рівняння (2.45) і

$$\left. \frac{d\varepsilon}{dh} \right|_{t=0} = \frac{K_\varepsilon}{V_0} = K_y. \quad (2.46)$$

Значення оцінки зносу озброєння долота $\frac{d\varepsilon}{dh}$ при $t = 0$ тим менша, чим менша швидкість зміни умовного зносу озброєння долота K_i . Слід зазначити, що залежність (2.46) визначається буримістю гірської породи, її абразивними властивостями, типорозміром бурового долота і керувальними діями.

Експериментальними дослідженнями доведено [10], що при бурінні в однорідних породах при постійних параметрах режиму буріння ($F = \text{const}$, $n = \text{const}$, $Q = \text{const}$) оцінка відносного зносу долота в основний період його роботи змінюється за лінійним законом

$$\varepsilon(t) = \frac{w(t)}{w_0} = 1 + K_\varepsilon t, \quad (2.47)$$

або

$$\varepsilon_y(t) = \frac{1}{v_0(t)} = \varepsilon_{y0} \varepsilon(t), \quad (2.48)$$

де $\varepsilon_{y0} = \frac{1}{v_0}$.

Якщо в межах досліджуваного інтервалу глибини свердловини поточні середні значення величини оцінки швидкості відносного зносу озброєння долота K_ε і оцінки інтенсивності відносного зносу озброєння долота K_i незмінні, то відповідну пачку гірських порід можна вважати однорідною за буримістю.

Отже показник $K_y = \frac{K_\varepsilon}{v_0}$ фактично є коефіцієнтом, який характеризує буримість гірських порід для даного типу долота, тобто коефіцієнтом буримості [53,55,56,57].

Із збільшенням глибини свердловини коефіцієнт буримості K_δ також зростає, оскільки початкове значення механічної швидкості буріння v_0 змінюється за рахунок того, що буримість гірських порід погіршується [58].

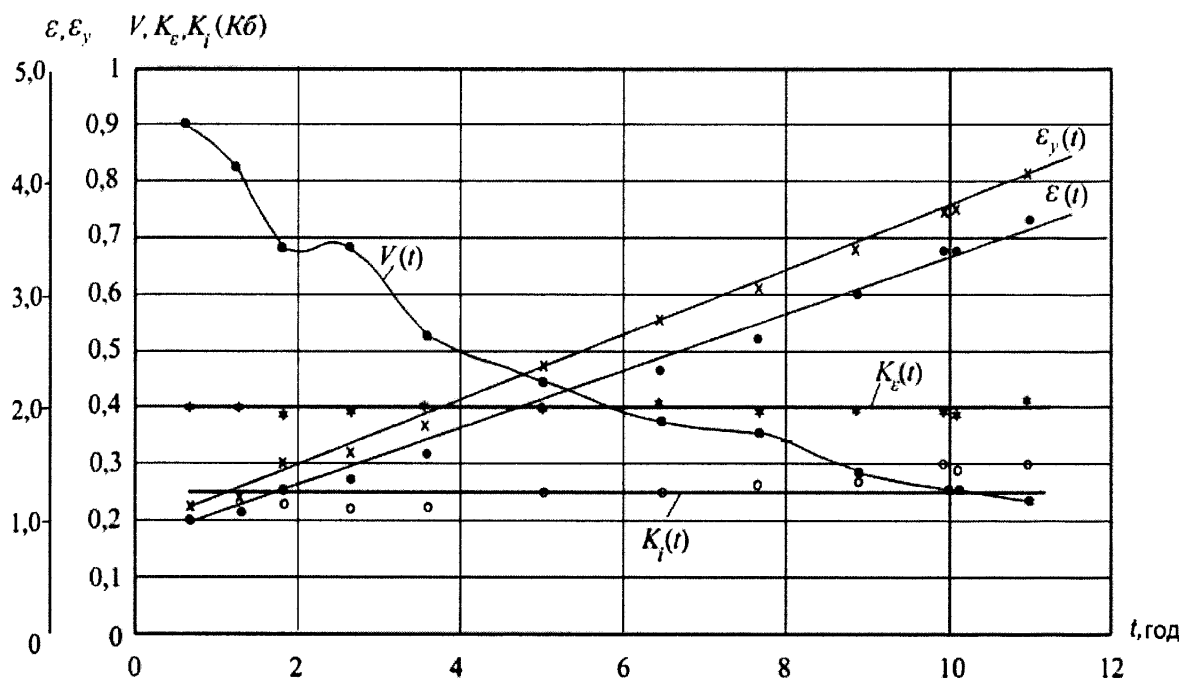


Рис. 2.8. Геометрична інтерпретація коефіцієнта буримості $K_i(K_\delta)$ на принципі буріння однорідного інтервалу 1450,0 – 1465,0 свердловини «Долина 833» шарошковим долотом Ш 295,3 СЗ-ГВ Д73 (осьова сила на долото $F = 100$ кН, $n = 230$ об/хв, $Q = 28,2$ л/с, міцність порід – тверді 100%): $v(t)$ – середня швидкість буріння, $\epsilon_y(t)$ – оцінка умовного зносу долота, $\epsilon(t)$ – оцінка відносного зносу озброєння долота, $K_e(t)$ – швидкість зміни оцінки відносного зносу долота, $K_i(K_\delta)(t)$ – оцінка інтенсивності відносного зносу долота

Геометричну інтерпретацію запропонованого коефіцієнта буримості K_i наведено на рис. 2.8, який побудовано за результатами експериментів, проведених на буровій «Долина 833» (Додаток А). Як бачимо з наведених графіків, механічна швидкість буріння v за 11 годин роботи долота на вибої свердловини зменшилася $v_0 = 0,9$ м/год. до $v = 0,24$ м/год.

Оскільки графік залежності $\epsilon_y(t)$ являє собою пряму лінію, то модель механічної швидкості буріння є гіперболічною

$$v(t) = \frac{v_0}{1 + K_\epsilon t}. \quad (2.49)$$

Слід зазначити, що графік зміни оцінки відносного зносу озброєння долота $\epsilon(t)$ являє собою пряму лінію, яка завжди починається з 1. Похибка

апроксимації закономірності зміни оцінки відносного зносу озброєння долота не перебільшує $\pm 2,5\%$.

Коефіцієнт K_y - це випадкова величина з математичним сподіванням $M[K_y] = 0,264$. Це свідчить про те, що процес буріння в умовах експерименту відбувався в однорідному за буримістю інтервалі гірських порід. Враховуючи те, що крім рівняння (2.49) механічної швидкості буріння, для моделювання процесу поглиблення свердловин використовують ряд інших, зокрема, лінійні, експоненціальні, гіперболічні та кореневі [10,34,73], були проаналізовані оцінки стану озброєння долота, передбачені цими методами. Встановлено, що усі вони базуються на співвідношеннях між початковою механічною швидкістю буріння v_0 і поточним значенням v_t , а саме $\varepsilon = \frac{v_0}{v_t}$; $\varepsilon = \left(\frac{v_0}{v_t}\right)^2$; $\varepsilon = \frac{v_t}{v_0}$.

Отже, запропонована методика визначення коефіцієнта буримості гірських порід може бути реалізована при будь-яких варіантах зміни в часі механічної швидкості буріння при використанні шарошкових доліт. Що стосується доліт типу PDC, то в зв'язку з тим, що для них $\varepsilon = \frac{v_0}{v_t} = 1$, визначення зміни буримості гірських порід і виявлення однорідних пачок порід може бути здійснене на базі контролю механічної швидкості буріння.

Висунута гіпотеза і сформульовані допущення дали змогу в результаті аналізу математичних моделей, наведених в табл.2.3, встановити, що під час буріння в однорідному за буримістю інтервалі гірських порід, коли керувальні впливи $F = \text{const}$, $n = \text{const}$, буримість гірських порід можна оцінити опосередкованою функцією $v_0 = \frac{v_t}{\varphi(t)}$, $\varphi(t)$ - функція, яка характеризує знос озброєння долота. Ця функція, що визначається з табл. 2.7, залежить від типу вибраної моделі.

2.7. Розроблення методики визначення базової механічної швидкості буріння

Запропоновано як базове значення механічної швидкості буріння обирати ту механічну швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним долотом або незатупленим буровим долотом з оптимальними параметрами режиму буріння. Задача вибору оптимальних параметрів режиму буріння вирішується розробленою системою оптимального управління [10], а визначення значень v_0 і K_{γ_0} здійснюється за допомогою відповідного алгоритму ідентифікації.

Отже, за результатами обробки експериментальних даних, отриманих під час буріння геологорозвідувальної або опорно-технологічної свердловини, будуються графіки залежностей базових показників буримості гірських порід $v_0(H)$ і $K_{\gamma_0}(H)$ і оптимальних параметрів режиму буріння. Останні є базою для вибору оптимальних рішень при проектуванні режимів буріння сусідніх свердловин, які буряться в аналогічних умовах.

Під час буріння в оптимальному режимі з постійними параметрами режиму математичну модель випадкового процесу зміни механічної швидкості буріння в часі можна представити у такому вигляді трьох складових [15]:

$$v_m(t) = v_d(t) + v_n(t) + v_{ст}(t), \quad (2.50)$$

де $v_d(t)$ – детермінована компонента механічної швидкості буріння;

$v_n(t)$ – нерегулярна випадкова, низькочастотна компонента, зумовлена зміною пластів гірських порід, яка характеризує зміну фізико-механічних властивостей гірських порід на глибині свердловини;

$v_{ст}(t)$ – нормальний стаціонарний в межах рейсу долота, ергодичний процес з нульовим математичним сподіванням.

Контролюючи закономірність зміни детермінованої компоненти $v_d(t)$, механічної швидкості $v(t)$, можна визначити зміну механічної швидкості буріння в часі. Оскільки в межах одного пласта гірських порід зміна швидкості

буріння пов'язана із збільшенням площі затуплення озброєння шарошкового долота, то за зміною детермінованої компоненти $v_d(t)$ можна оцінити абразивні властивості гірських порід і зносостійкість оснащення долота.

Сумарна складова швидкості $v_m(t)$ в формулі (2.50) може бути визначена методом поточного середнього. Якщо буріння ведеться з постійними параметрами режиму в однорідній породі, то ця складова дорівнює детермінованій компоненті

$$v_{m.сер}(t) = v_d(t) = \frac{v_{m.сер}(0)}{\varepsilon(t)}, \quad (2.51)$$

а з урахуванням формули (2.45)

$$v_{m.сер}(t) = \frac{v_{m.сер}(0)}{1 + K_\varepsilon t}, \quad (2.52)$$

де $v_{m.сер}(0)$ – початкове значення середньої механічної швидкості буріння.

У відповідності з формулою (2.51) детермінована компонента $v_d(t)$ містить інформацію, яка дозволяє судити за значенням $v_{m.сер}(0)$ про буримість гірської породи і руйнівну здатність долота, а по K_ε – про абразивність гірської породи і зносостійкість зубів шарошок долота.

За відхиленням сумарної складової $v(t)$ від $v_d(t)$ можна визначити зміну гірських порід і оцінити характер зміни в часі або за глибиною свердловини.

Отже, буримість гірської породи і руйнуючу спроможність долота можна оцінити безконтактним методом за механічною швидкістю v_0 при бурінні незатупленим долотом в оптимальному режимі. Розроблений безконтактний метод контролю буримості гірських порід дозволяє оцінювати цю властивість гірських порід в реальному часі, користуючись інформацією про механічну швидкість буріння і інтенсивність відносного зношення долота при бурінні в оптимальному режимі.

Висновки до другого розділу

В ході проведених теоретичних досліджень щодо удосконалення безконтактного методу контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин отримано наступні результати:

1. Сформульовано визначення однорідного інтервалу порід (однорідної пачки порід), як інтервалу глибин, на якому вектор інформативних параметрів не суттєво відхиляється від середнього значення на цьому інтервалі, що дозволило встановити вектор допустимих похибок розбиття розрізу на однорідні за буримістю ділянки і визначити напрямки подальших досліджень щодо удосконалення методу безконтактного контролю буримості гірських порід шляхом розроблення автоматизованої системи контролю на базі ефективної математичної моделі буримості гірських порід.

2. З позицій системного підходу і автоматизованого контролю сформульовано вимоги до математичної моделі буримості гірських порід, що дозволило визначити напрямки удосконалення математичної моделі буримості гірських порід.

3. Розроблено структуру моделі процесу буріння нафтових і газових свердловин як об'єкта контролю буримості гірських порід і визначено клас задачі контролю, як визначення подій в умовах невизначеності, що дало змогу обґрунтовано вибрати контрольовані величини, які піддаються вимірюванню в реальному часі, що дозволяє визначити цю характеристику гірських порід безконтактним методом в процесі поглиблення свердловини.

4. Отримано узагальнену математичну модель буримості гірських порід, координатами якої є проходка долота і змінна, що характеризує зношення озброєння долота.

5. Запропоновано як базове значення механічної швидкості буріння для контролю буримості гірських порід обирати ту механічну швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним долотом або незатупленим шарошковим долотом при бурінні з оптимальними параметрами режиму буріння, що дає змогу визначити зв'язок показника буримості з глибиною свердловини, які є базою для вибору оптимальних рішень при проектуванні режимів буріння інших свердловин, які буряться в аналогічних умовах.

РОДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ І РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД І ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

3.1. Ідентифікація параметрів математичної моделі механічної швидкості буріння

Як приклад, наведемо дискримінацію сукупності моделей $v_t = v_0 \varphi(t)$ для умов буріння свердловини №86 Прикарпатського УБР ВАТ «Укрнафта». Буріння експлуатаційної свердловини велось буровою установкою УЭ-76 до проектної глибини 3750 м, роторним способом. Тип ротора Р-560-6, потужність приводу 368 кВт. Міцність порід до глибини 2170 м – м'які і середні; з глибини 2170 м до 3750 м – середні і тверді. Буріння проводилось трьохшарошковими долотами. В діапазоні глибини 400-2300 м було використано долоти типу:

III 295,3 МСЗ-ГНУ(Р-37) – 3 шт.

III 295,3 МСЗ-ГАУ – 3 шт.

III 295,3 С-ГВ – 16 шт.

III 295,3 М-ГВ – 7 шт.

III 295,3 М-ЦВ – 1 шт.

III 295,3 МС-ГВ – 1 шт.,

В діапазоні 2300-3750м:

III 215,9 СЗ-ГАУ(Р-16) – 6 шт.

III 215,9 СТ-ГВ(Р-14) – 6 шт.

III 215,9 СТ-ЦВ – 3 шт.

III 215,9 С-ГН – 22 шт.

III 215,9 СЗ-ГВ – 8 шт.

III 215,9 СЗ-ГВ – 3 шт.

III 215,9 ТЗ-ГН(Р-15) – 5 шт.

При бурінні вказаних діапазонів глибини свердловини було використано 84 долота. Під час експериментів вимірювали проходку долота, підтримуючи постійне осьове навантаження на долото і частоту його обертання. Осьове навантаження було таким: в інтервалі буріння 400-800м $F = 140$ кН, а в інтервалі 800-1760м – 160 кН, а в інтервалі 1760-3750м – 180 кН. Швидкість обертання ротора була постійною по всій глибині свердловини $n = 1,3$ с⁻¹. Продуктивність насоса в досліджуваному діапазоні була $Q = 32,3$ л/с. При постійних значеннях осьового навантаження на долото і швидкості його обертання вимірювалась проходка долота і обчислювалась механічна швидкість буріння.

Були використані прилади, що виготовляються серійно, а саме:

давачі проходки долота – давач положення талевого блоку ДП-ДГК2.780.010;

давачі осьової сили на долото – давач зусиль ДС2-ДС4-ДГК2.782.012-12;

давачі швидкості обертання ротора – давач частоти ДЧ-ДГК.780.008;

ППМ – прилад, що показує крутний момент на роторі;

ПНУ – прилад, що вимірює і показує рівень бурового розчину.

Отримані результати досліджень обробляли на комп'ютері за стандартними програмами, які відповідали поставленій в роботі задачам.

З метою ідентифікації параметрів математичної моделі експериментальні дослідження проведені за певним планом, суть якого у тому, що вибирались інтервали часу (додаток Б) Δt_i , щоб складова дрейфу від відліку до відліку змінювалась на ту саму величину Δl_i .

На буровій установці оператор робить один крок подачі бурильного інструменту за допомогою гальма бурової лебідки. Тоді, кожному експерименту відповідає певне значення дрейфу механічної швидкості буріння.

Таким чином, у процесі проведення експериментального дослідження отримують послідовність значень $v_t^{(i)} = \Delta l(t) / \Delta t_i$, де $i = \overline{1, N}$ – кількість інтервалів часу Δt_i . Задача полягає у тому, щоб за експериментальними даними $v_t^{(i)}$ визначити параметри моделі v_t , тобто початкову механічну швидкість v_0 , і

величину L , яка входить до структури залежності $\varphi(L, t)$. Параметр L буде визначатись значенням показника m у рівнянні (3.1): $L \in \{K_R, K_v, K_e, K_q\}$.

Параметри моделі $\widehat{v}_t = v_0 \varphi(L, t)$ будемо визначати за методом найменших квадратів (МНК-метод), тобто будемо мінімізувати функціонал:

$$J(v_0, L) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v(t_i) - \widehat{v}(t_i))^2.$$

Враховуючи значення $\widehat{v}_t = v_0 \varphi(L, t_i)$ будемо мати:

$$J(v_0, L) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (v(t_i) - v_0 \varphi(L, t_i))^2. \quad (3.1)$$

Знайдемо мінімум функціоналу (3.1), прирівнявши до нуля часткові похідні

$$\frac{\partial J(v_0, L)}{\partial v_0} = 0, \quad \frac{\partial J(v_0, L)}{\partial L} = 0.$$

Із першої умови знаходимо

$$v_0 = \frac{\sum_{i=1}^N v(t_i) \varphi(L, t_i)}{\sum_{i=1}^N \varphi^2(L, t_i)}. \quad (3.2)$$

Друга умова дає змогу отримати таке рівняння:

$$\sum_{i=1}^N (v(t_i) - \widehat{v}(t_i)) v_0 \frac{\partial \varphi(L, t_i)}{\partial L} = 0. \quad (3.3)$$

Якщо позначити $\gamma(L, t_i) = \frac{\partial \varphi(L, t_i)}{\partial L}$, то (3.3) набуде такого вигляду:

$$\sum_{i=1}^N (v(t_i) \gamma(L, t_i) - v_0 \varphi(L, t_i) \gamma(L, t_i)) = 0. \quad (3.4)$$

Якщо тепер підставити (3.2) у (3.1), то отримаємо нелінійне рівняння, яке необхідно розв'язати відносно L .

Значення функцій $\varphi(L, t_i)$ і $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m наведені у табл.3.1.

Таблиця 3.1

Значення функцій $Y(L, t_i)$ і $\gamma(L, t_i)$ для різних значень m

m	$\varphi(L, t_i)$	L	$\gamma(L, t_i) = \partial\varphi(L, t_i)/\partial L$
0	$1 - K_R t_i$	K_R	$-t_i$
1	$e^{-K_v t_i}$	K_v	$t_i e^{-K_v t_i}$
2	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t_i}$	K_ε	$-\frac{t_i}{(1 + K_\varepsilon t_i)^2}$
3	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t_i}}$	K_q	$\frac{t_i}{2\sqrt{1 + K_q t_i}}$

Оскільки рівняння (3.4) аналітично розв'язати неможливо, то для його розв'язку застосований метод дихотомії.

Крім моделей $v_i = v_0 \varphi(t)$ були вибрані моделі $v_i = a_0 + a_1 t$, $v_i = v_0 t^\beta$ і $v_i = a_0 + a_1 \ln t$. Перша і третя моделі є лінійними відносно своїх параметрів. Другу модель легко привести до лінійної, якщо прологарифмувати ліву і праву її частини:

$$\ln v(t_i) = \ln v_0 + \beta \ln(t_i).$$

Ввівши тепер нові змінні $y_i = \ln v(t_i)$, $x_i = \ln(t_i)$, $\alpha = \ln v_0$, отримуємо модель $y_i = \alpha + \beta x_i$, яка буде лінійною відносно параметрів α і β .

Якщо тепер до вказаних моделей застосувати МНК-метод, то отримаємо наступне рівняння:

$$\bar{a} = CF^T \bar{Y},$$

де \bar{a} – вектор параметрів моделі;

$C = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця;

\bar{Y} – вектор вихідних величин.

У нашому випадку

$$a \in \left\{ (a_0, a_1)^T; (\alpha, \beta)^T; (a_0, a_1)^T \right\}.$$

Дисперсійна матриця для першої моделі:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ 1 & t_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & t_N \end{bmatrix},$$

для другої

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \ln t_1 \\ 1 & \ln t_2 \\ 1 & \ln t_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & \ln t_N \end{bmatrix}$$

і для третьої моделі

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & x_N \end{bmatrix}.$$

Перерахунок значень v_0 для другої моделі здійснювався за формулою:

$$v_0 = e^{\alpha}.$$

Адекватність отриманих моделей перевірили за допомогою кореляційного зв'язку між експериментальними значеннями $v(t_i)$ і розрахунковими - $\hat{v}(t_i)$.

Перевагу віддавали моделі з найбільшим значенням коефіцієнта кореляції R .

Оскільки, під час буріння за умов неперервного дрейфу $v(t)$ дублювати експеримент неможливо, то перевірку відтворюваності не проводили. Результати експериментів були перевірені на відповідність нормальному закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова і визначені параметри розподілу: оцінка генеральної дисперсії S_x^2 і середнє квадратичне відхилення σ . Встановлено, що, оскільки параметр $d_{\max} < d^*$, де d^* - критичне значення критерію Колмогорова-Смірнова, результати експериментів задовільно описуються нормальним законом розподілу (Додаток Б).

Оцінки коефіцієнтів і характеристики математичних моделей механічної швидкості проходки наведено у таблиці 3.2.

В додатку Б наведено приклади графіків змін механічної швидкості проходки в часі для різних доліт і глибин свердловини.

Таблиця 3.2

**Оцінки коефіцієнтів і характеристики математичних моделей
механічної швидкості проходки**

$v(t)$	m_x	S_x^2	σ	d_{\max}	Степень кореля- ційного зв'язку	Рівняння моделі
						$v(t)=f(t)$
Додаток Б (рис.а)	0,114	0,0338	0,184	0,288 $d^*=0,375$	0,961 0,9331	$v_t=0,358e^{-0,331t}$ $v_t=0,204t^{-1,734}$
Додаток Б (рис.б)	0,111	0,0206	0,163	0,277 $d^*=0,375$	0,9034 0,977	$v_t=0,161\ln(t)+0,342$ $v_t=0,437e^{-0,439t}$
Додаток Б (рис.в)	0,227	0,082	0,287	0,234 $d^*=0,375$	0,6257 0,9751	$v_t=-0,064t+0,0539$ $v_t=0,633e^{-0,36t}$
Додаток Б (рис.г)	8,04	0,623	0,789	0,127 $d^*=0,242$	0,885	$v_t=-0,064t^3+0,021t^2-$ $-0,397t+9,108$
Додаток Б (рис.д)	1,88	0,036	0,191	0,15 $d^*=0,26$	0,7526	$v_t=-0,01t^2+0,011t+$ $+2,195$
Додаток Б (рис.е)	0,124 0,127 0,216	0,0302 0,027 0,077	0,174 0,166 0,278	0,264 0,186 0,134 $d^*=0,375$	0,981 0,987 0,978	$v_t=5,5/(1+0,151t)$ $v_t=6/(0,822+0,091t)$ $v_t=7/(10,751+$ $+0,092t)$

Оскільки механічна швидкість проходки визначається через диференціювання проходки $h(t)$, то для виключення впливу помилки диференціювання за результатами аналізу визначили поточне значення проходки $h(t)$. Проінтегровані рівняння механічної швидкості проходки у вигляді експоненціальної і гіперболічної залежностей. Тоді маємо

$$h(t) = \frac{V_0}{\theta} (1 - e^{-\theta t}), \quad (3.6)$$

$$h(t) = \frac{V_0}{K_\varepsilon} \ln(K_\varepsilon t + 1). \quad (3.7)$$

Для оцінки параметрів нелінійних моделей (3.6) і (3.7) методом найменших квадратів мінімізувалась функція нев'язки

$$I(v_0, K_\varepsilon) = \sum_{i=1}^N (H_i - h_i)^2, \quad (3.8)$$

$$\text{або} \quad I(v_0, K_\varepsilon) = \sum_{i=1}^N \left(H_i - \frac{v_0}{K_\varepsilon} \ln(K_\varepsilon t + 1) \right)^2, \quad (3.9)$$

де H_i – експериментальні значення проходки долота;

h_i – обчислені значення проходки, $i = \overline{1, N}$;

N – кількість експериментальних точок.

Результати порівнянь математичних моделей механічної швидкості проходки одержані за допомогою ЕОМ. Критерієм адекватності прийнято значення дисперсії адекватності

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - h_i)^2. \quad (3.10)$$

Проведений аналіз результатів обчислень свідчить, що 50% моделей апроксимують результати експерименту з оцінкою дисперсії $\sigma^2 \leq 10^{-4}$. В більшості моделей, які виражені експоненціальною та гіперболічною залежностями, точність обчислень є найвищою. Проте, кожний інтервал буріння гірських порід, що мають певну міцність найкраще апроксимує одна із сукупностей моделей, наведених в табл.3.2. Отже, проведений аналіз свідчить, що не існує єдиної математичної моделі механічної швидкості буріння, яка б найточніше описувала закономірності зміни механічної швидкості буріння в часі на будь-якій глибині свердловини.

Слід зазначити, що при розбурюванні гірських порід з різною буримістю долотами різних типорозмірів при різних, але постійних параметрах режиму буріння, механічна швидкість буріння v_t у більшості випадків змінюється внаслідок зношування озброєння долота за гіперболічним законом. Тому при подальших дослідженнях перевагу надамо моделі (3.7), з меншим значенням дисперсії адекватності.

Оскільки кількість членів апроксимуючих рівнянь менше ніж кількість експериментальних точок, адекватність математичної моделі в умовах експоненціального дрейфу перевірили за допомогою F -критерію Фішера. Критерій Фішера дозволяє перевірити гіпотезу про однорідність двох вибірових

дисперсій $\sigma_{ад}^2$ і $\sigma_{від}^2(v)$, де $\sigma_{ад}^2$ - дисперсія адекватності, $\sigma_{від}^2(v)$ - найкраща оцінка дисперсії відтворюваності експерименту. Оскільки в умовах буріння відтворити експеримент неможливо, дисперсію експерименту $\sigma_{від}^2(v)$ беремо з іншого експерименту на сусідньому інтервалі буріння, для якого вибірка містить N_1 незалежних вимірювань випадкової змінної v_1 , розподіленої також за нормальним законом з середнім значенням $v_{сер}$ і дисперсією $\sigma_{від}^2(v)$.

Оскільки апріорі відомо, що $\sigma_{ад}^2 > \sigma_{від}^2(v)$, F -критерій характеризується відношенням $F = \frac{\sigma_{ад}^2}{\sigma_{від}^2(v)}$.

Визначимо критичні значення $F_{кр}$ в залежності від числа степенів свободи чисельника і знаменника для F -розподілу Фішера при рівні значущості $q=0,05$ для результатів експериментів, наведених на рисунках додатку Б (табл.3.3).

Таблиця 3.3

Критичні значення F -критерію Фішера для певного типу моделей

Модель	Рівняння моделі	F -критерій
a	$V = 0,2048t^{-1,7346}$	4,75
b	$V = 0,437e^{-0,4395t}$	4,75
v	$V = 0,6332e^{-0,36t}$	4,75
z	$V = -0,3974t + 9,1081$	4,17
δ	$V = -0,0017t^2 + 0,0112t + 2,1958$	4,30
e_1	$V = 5,5/1 + 0,151t$	4,54
e_2	$V = 6/0,822 + 0,091t$	4,60
e_3	$V = 7/10,781 + 0,192t$	4,95

Тепер визначимо емпіричне значення F -критерію Фішера для кожного із вище названих експериментів. Використовуючи експериментальні дані, знаходимо відношення значень $\sigma_{ад}^2 / \sigma_{від}^2(v)$ для кожного експерименту, що розглядається (табл.3.4).

Таблиця 3.4

Результати перевірки адекватності математичного опису закономірностей зміни механічної швидкості буріння в часі за F -критерієм Фішера для $\alpha=0,05$

Модель	Кількість експериментальних точок	F -критерій	$\sigma_{ад}^2 / \sigma_{від}^2(v)$
<i>a</i>	12	4,75	1,72
<i>б</i>	12	4,75	3,06
<i>в</i>	12	4,75	3,03
<i>г</i>	30	4,17	2,31
<i>д</i>	22	4,30	2,55
<i>e</i> ₁	15	4,54	1,9
<i>e</i> ₂	14	4,60	3,48
<i>e</i> ₃	17	4,95	2,76

Оскільки обчислені за результатами спостережень емпіричні значення F -критерію Фішера менше критичного $F_{кр}$ [76] для відповідних степенів свободи при заданому рівню значущості $\alpha=0,05$, то гіпотези про адекватність моделей не відкидаються. Що стосується залежності початкової механічної швидкості буріння v_0 від керувальних дій F і n , то апріорі відомо, що ця залежність має нелінійний характер.

Тому для математичного опису цих залежностей використаємо багатовимірну нелінійну апроксимацію, яка має вигляд многочлена:

$$y = \sum_{i=1}^k a_i \prod_{j=1}^N U_i^{q_{js}}, \quad (3.11)$$

де U_i – керувальні впливи;

a_i – коефіцієнти полінома (параметри моделі);

q_{js} – невід'ємні цілі числа, які обмежені величинами Q_i ,

$$0 \leq q_{js} \leq Q_i,$$

N – кількість керувальних впливів.

Моделі поліномного виду характерні тим, що за їх допомогою будь-яка аналітична функція може бути описана як завгодно точно. Проте зі збільшенням

степеня полінома збільшується число оцінюваних параметрів моделі і відповідно зростають втрати на експеримент, тому обмежимося вибором квадратичної функції. Таким чином, функціональна залежність буде мати такий вигляд:

$$v_0(F, n) = a_0 + a_1 F + a_2 n + a_3 F^2 + a_4 n^2 + a_5 F n . \quad (3.12)$$

Для ідентифікації параметрів моделі використано метод найменших квадратів, який дозволяє побудувати оптимальну оцінку моментів розподілу похибки експерименту, а також вирішити питання адекватності моделі [79].

3.2. Методика розбивки інтервалу буріння на пачки гірської породи

Задача оцінки буримості гірських порід тісно пов'язана із задачею розбивки гірської породи на пачки.

Для вирішення поставленої задачі необхідно сформулювати деякий критерій, який би характеризував певні властивості гірських порід. Як показує аналіз формули (3.1), таким критерієм може слугувати параметр L (табл.3.2) функціональної залежності $v_t = v_0 \varphi(L, t)$. У роботі [10] введено поняття оцінки стану озброєння долота як відношення початкової швидкості проходки v_0 до поточної v_t за винятком моделі $m = 0$, для якої оцінка стану озброєння долота визначається як відношення поточної швидкості проходки v_t до початкової v_0 .

Для того, щоб визначити v_0 необхідно пробурити певний інтервал h_0 на протязі фіксованого часу t_0 . Час t_0 вибирається таким чином, щоб знос озброєння долота був близький до нульового. Тоді.

$$v_0 = \frac{h_0}{t_0} .$$

Потім обчислюється послідовність значень

$$v(t_i) = \frac{\Delta h_i}{\Delta t_i} ,$$

де $\Delta h_i = h(t_i) - h(t_{i-1})$ - приріст проходки за час $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, i – номер спостереження.

Як правило, Δh_i вибирається постійним і

$$v_i \frac{\Delta h}{\Delta t_i}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

де $v_i = v(t_i)$.

Наприклад, для $m=0$ будемо мати

$$\xi(t) = \frac{v_t}{v_0} = 1 - K_R t.$$

Звідси знаходимо

$$K_{R_i} = \frac{1}{t_i} \left(1 - \frac{v_i}{v_0} \right),$$

де t_i – поточний час i -го відліку (відлік часу здійснюється від t_0).

Для $m=1$ будемо мати:

$$\frac{v_0}{v_t} = \theta = e^{K_v t}.$$

Звідси знаходимо

$$K_{v_i} = \frac{1}{t_i} \ln \frac{v_0}{v_i}.$$

Тепер нехай $m=2$, тоді:

$$\frac{v_0}{v_t} = \varepsilon = 1 + K_\varepsilon t$$

і

$$K_{\varepsilon_i} = \frac{1}{t_i} \left(\frac{v_0}{v_t} - 1 \right).$$

І, на кінець, для $m=2$ будемо мати

$$\left(\frac{v_0}{v_t} \right)^2 = 1 + K_q t,$$

тобто

$$K_{q_i} = \frac{1}{t_i} \left(\left(\frac{v_0}{v_i} \right)^2 - 1 \right).$$

Отримані результати дають змогу визначити критерій $L_i \in \{K_{R_i}, K_{v_i}, K_{\varepsilon_i}, K_{q_i}\}$ (табл.3.5), який буде характеризувати сукупні фізико-механічні властивості гірської породи.

При переході долота із одного пласта в інший показник L_i стрибкоподібно змінює своє значення. Оскільки процес обчислення значення L_i генерує послідовність дискретних величин.

$$L_i = \hat{L} + v_L,$$

де \hat{L} – математичне сподівання величини L_i ;

v_L – перешкода, викликана з однієї сторони інструментальними похибками вимірювань, а з іншої – зміною властивостей породи всередині пласта.

Таблиця 3.5

Значення критерія L_i виявлення меж пластів

m	Оцінка стану озброєння долота	Значення критерію L_i
0	$\xi = \frac{v_t}{v_0}$	$K_{R_i} = \frac{1}{t_i} \left(1 - \frac{v_i}{v_0} \right)$
1	$\theta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{v_i} = \frac{1}{t_i} \ln \frac{v_0}{v_i}$
2	$\varepsilon = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{\varepsilon_i} = \frac{1}{t_i} \left(\frac{v_0}{v_i} - 1 \right)$
3	$\zeta = \frac{v_0}{v_t}$	$K_{q_i} = \frac{1}{t_i} \left(\left(\frac{v_0}{v_i} \right)^2 - 1 \right)$

На відміну від роботи [10], де критерій виявлення меж пластів формується на основі спостережень за $K_{\varepsilon_i} = \Delta \varepsilon_i / \Delta t_i$, нами запропоновано узагальнений критерій L_i , який ґрунтується на вимірюванні швидкості буріння v_i , що знижує рівень шуму, який накладається на значення L_i , а це є передумовою підвищення точності виявлення моменту переходу долота із пласта в пласт.

Оскільки величина \hat{L} спотворена перешкодою, то стрибок значення \hat{L} , що відповідає моменту переходу долота через пласт буде маскуватися цією перешкодою.

Припустимо, що до моменту зміни пластів відомі статистичні характеристики перешкоди v_L , а після переходу долота в інший пласт

стаціонарність перешкоди v_L не змінилась. Таким чином, виникає така задача: на основі спостережень за величиною L_i при постійних режимних параметрах необхідно виявити момент переходу долота в інший пласт [77,78].

На сьогоднішній день у нафтовій та газовій промисловості відомі різні оперативні методи контролю і оцінки меж пластів гірських порід в реальному часі при бурінні свердловин на нафту і газ [58,59,60,61].

Зміну властивостей гірських порід при переході долота із одного пласта в інший при бурінні свердловин на нафту і газ можна розглядати як момент зміни властивостей випадкових процесів, тому, що сам процес руйнування гірської породи є випадковим і не відтворюваним в часі. Проблема виявлення моментів зміни властивостей випадкових процесів виникає при вирішенні багатьох прикладних задач у різних галузях науки і промисловості. З цією проблемою доводиться стикатися, наприклад, при виявленні явищ живої породи, вирішенні задач управління, технологічної діагностики, обробки даних вимірювань [62÷71].

Питаннями дослідження моментів зміни властивостей випадкових процесів вчені займаються протягом півстоліття.

Вперше задача виявлення зміни властивостей випадкової послідовності була виявлена і поставлена Є. С. Пейджом у 1954р. [57]. При цьому задача виявлення зміни середнього значення послідовності незалежних випадкових величин розв'язувалась в рамках класичної теорії розпізнавання гіпотез з використанням як статистики критерію кумулятивних сум. Цю ідею розвинули в своїх роботах [62,63,64] вчені і дослідники.

Оригінальний метод визначення моментів зміни властивостей вінерівського випадкового процесу при заданому рівні помилкових тривог був запропонований А. М. Колмогоровим і А. М. Ширяєвим та опублікований в роботі [65].

Пізніше цей метод був розвинений в самостійний напрям оптимальної зупинки спостережень. В той момент часу цікавий у теоретичному відношенні спосіб виявлення моментів зміни властивостей випадкових процесів важко було застосувати на практиці, так як він вимагав розв'язку складних нелінійних диференціальних рівнянь. В даний момент із використанням сучасної комп'ютерної техніки і програмного забезпечення ця задача вирішується успішно.

Даній проблемі присвячено багато робіт. Серед них слід виділити роботи, які базуються на методі Бейєса [66, 67, 68, 69].

Проведений аналіз літературних даних за проблемами оцінки моменту зміни властивостей випадкових процесів можна розділити на дві частини.

Перша частина аналізу присвячена питанням оцінки моменту змін статистичних властивостей випадкових процесів у неперервному і дискретному часі за спостереженнями кінцевої реалізації. Представлені бейєсовські методи виявлення змін властивостей випадкових процесів, що описуються диференціальними і різницевиими стохастичними рівняннями. Описані також методи виявлення моментів зміни властивостей випадкових процесів, що спостерігаються в шумах. Розглянуті методи визначення точності оцінки моментів зміни властивостей випадкових процесів, що описуються рівняннями авторегресії.

Для кожного із розглянутих методів у наведених вище роботах обговорені їх переваги і недоліки.

У другій частині розглянуті питання виявлення моментів часу зміни статистичних властивостей процесів із застосуванням методів послідовного статистичного аналізу [77,78]. Представлені тести послідовного виявлення моментів зміни властивостей випадкових процесів.

На основі розглянутих методів і алгоритмів оцінки моментів зміни випадкових процесів розроблений метод визначення меж гірських порід у процесі буріння [61].

Суть методу в наступному. На основі спостережень за випадковим дискретним процесом L_i , формується функція

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^2} (L_i - \hat{L})^2, \quad (3.12)$$

де $\sigma_L^2 = M \left[(L_i - \hat{L})^2 \right]$ - дисперсія адитивної перешкоди v .

До моменту зміни пласта $\sigma_L = \sigma_L^{(1)}$, $L_i = L_i^{(1)}$, $\widehat{L} = \widehat{L}^{(1)}$ і послідовність g_i

на кожному кроці спостережень співпадає з послідовністю $\left\{ \frac{1}{\sigma_L^{(1)2}} v_{L_i}^{(1)} \right\}$, де

$$v_L^{(1)} = L_i^{(1)} - \widehat{L}^{(1)}. \text{ Тому } M[g_i]=1.$$

Нехай в дискретний момент часу i_0 відбувся перехід долота із одного пласта в інший. Тоді рівняння (3.12) з врахуванням того, що $L_i = \widehat{L}^{(2)} + v_L^{(2)}$, набуде такого вигляду:

$$g_i = \frac{1}{\sigma_L^{(2)2}} (\Delta \widehat{L} + v_{L_i}^{(2)})^2, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \Delta \widehat{L} = \widehat{L}_i^{(2)} - \widehat{L}^{(1)}, \quad \sigma_L^{(2)2} = M(L_i - \widehat{L}^{(2)})^2.$$

Математичне сподівання випадкової послідовності (3.13) буде

$$M[g_i] = (\Delta \widehat{L}^2 + \sigma_L^{(2)2}) / \sigma_L^{(1)2}, \quad \text{при } i > i_0. \quad (3.14)$$

Центруючи послідовність g_i , матимемо $M[g_i - 1] = 0$ при $i < i_0$ і коли $i > i_0$ математичне сподівання послідовності g_i буде визначатись за формулою (3.14).

На кожному кроці спостережень разом з дискретною послідовністю g_i будемо обчислювати функцію [61, 10]

$$G_i = \sum_{R=1}^i \frac{g_R - 1}{\sqrt{2i}}. \quad (3.15)$$

Оскільки $M[G_i] = \frac{1}{\sqrt{2i}} \sum_{R=1}^i M[g_R - 1] = 0$, то до моменту дискретного часу, поки долото не перейшло в інший пласт математичне сподівання функції G_i дорівнює нулю.

Після того, як долото перейшло в наступний пласт

$$M[G_i] = \frac{1}{\sqrt{2i}} \left(\sum_{R=1}^{i_0} M[g_R - 1] + \sum_{R=i_0+1}^i M[g_R - 1] \right).$$

Перший доданок у дужках дорівнює нулю. Тому

$$M[G_i] = \sum_{R=i_0+1}^i M[g_R - 1].$$

з врахуванням формули (3.14), отримаємо

$$M[G_i] = \frac{S_m(i - i_0 - 1)}{\sqrt{2i}},$$

$$\text{де } S_m = \frac{\Delta \bar{L}^2}{\sigma_L^{(1)2}} + \frac{\sigma_L^{(2)2}}{\sigma_L^{(1)2}} - 1.$$

Таким чином, до моменту переходу долотом меж пластів значення функції G_i коливається біля середнього значення, після того як долото перейшло в інший пласт ($i > i_0$) послідовність $|G_i|$ у середньому зростає з плином часу. Враховуючи цю властивість функції G_i , для виявлення моменту часу i_0 переходу долота в інший пласт використано процедуру порівняння значення G_i у кожний момент часу з певним порогом Δg . За оцінку значення i_0 береться величина, для якої виконується умова

$$|G_i| \geq \Delta g.$$

Показано [10], що $\Delta g = 2,5$.

Функцію G_i зручно обчислювати за рекурентною процедурою [10,49].

$$G_i = \sqrt{1 - \frac{1}{i}} G_{i-1} + \frac{g_i - 1}{\sqrt{2i}}. \quad (3.16)$$

Алгоритм виявлення меж пластів, в основі якого лежить рекурентне співвідношення (3.16) носить назву G -алгоритму.

Для зменшення похибки оцінки моменту часу переходу долотом меж двох пластів у [10] запропоновано спільне використання G -і так званого Z -алгоритмів.

Нехай в кожний дискретний момент часу буріння i проводиться вимірювання L_i і за даними одержаної сукупності приймається рішення $d(i)$ про наявність ($d(i)=1$) або відсутність ($d(i)=0$) моменту зміни властивостей випадкової величини. У тому випадку, коли приймається рішення $d(i)=0$, спостереження продовжуються, в іншому випадку проводиться перевірка. Якщо зміна моменту пласта відбулася, то спостереження припиняються.

Основними параметрами Z -алгоритму є числа N , α і c , які повинні задовольняти наступним умовам:

$$N \geq N_0 = [1/\alpha], \quad 0 < \alpha < 0,5, \quad 0,5 < c < 1,$$

де $[1/\alpha]$ – ціла частина числа $1/2$.

На кожному кроці спостережень за випадковою величиною L_i будемо обчислювати функцію

$$Z(m, N) = \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_i - \frac{1}{N-m} \sum_{i=m+1}^N L_i \right|. \quad (3.17)$$

Для функції Z_m правило виявлення меж пластів має наступний вигляд:

$$d_N(i_0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{m}/N > c \\ 0, & \text{якщо } \hat{m}/N \leq c \end{cases} \quad (3.18)$$

де $\hat{m} = i_0$ – оцінка моменту переходу долотом межі двох пластів.

Процедура визначення моменту i_0 за Z-алгоритмом складається з наступних кроків:

К1. Обчислити послідовність Z_m за формулою (3.17) для $m = [\alpha N], [\alpha N + 1], \dots, N - [\alpha N]$,

К2. Визначити $A(m) = \max(Z_m)$,

К3. Визначити таке \hat{m} , що

$$m \in \{[\alpha N] \leq m \leq N - [\alpha N] \mid Z_m = A(m)\}.$$

К4. Порівняти величину \hat{m}/N з пороговим значенням C у відповідності з (3.18), якщо $d_N(i) = 1$, то оголошується «тривога», то здійснюється перехід до К6; в іншому випадку, змінити N на $N+1$ і перейти до К1.

К6. Кінець обчислень.

Даний алгоритм було перевірено під час визначення моменту зміни пласта гірських порід для бурової «Спас-101» Долинського УБР на глибині 2823-2865м. Для цього вибираємо наступні параметри алгоритму: $N = 62$; $\alpha = 0,2$, $\Delta = 0,55$, то $[\alpha N] = 12$ і $N - [\alpha N] = 50$, тобто $m = 11, 12, \dots, 50$, графік функції $Z(m, N)$ приведений на рис. 3.1, з якого випливає, що $m = 38$ і функція $Z(m, N)$ досягає максимуму. Обчислюємо $m/N = 38/62 = 0,61$. Так як $m/N > c$, то оголошується тривога $d_N = 1$. Для здійснення перевірки Z-алгоритму використовується G-алгоритм, графік якого наведено на рис.3.1.

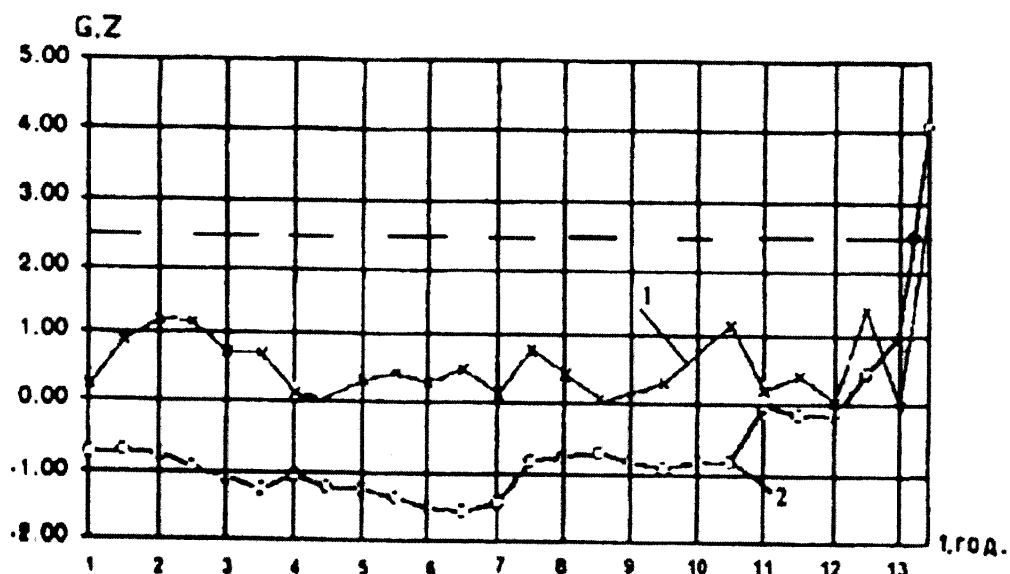


Рис. 3.1. Графіки зміни в часі G-функції і Z-алгоритму:
 1 - G-функція; 2 - Z-алгоритм (бурова «Спас-101; $H = 2823-2865\text{м}$;
 $F = 176,4\text{ кН}$; $n = 1\text{с}^{-1}$ »)

Для реалізації даних алгоритмів розроблена функціональна структура мікропроцесорного пристрою, яка наведена на рис.3.2.

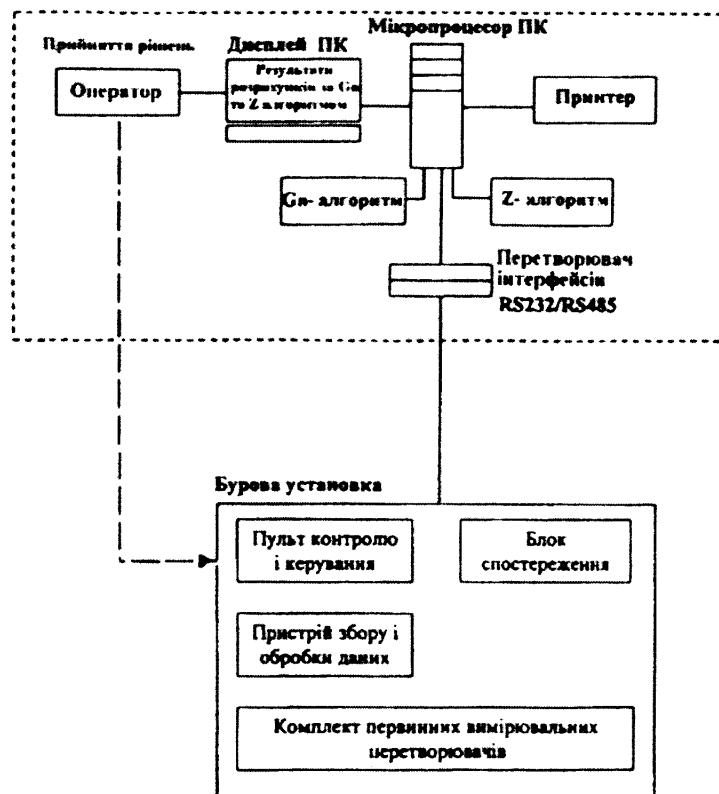


Рис. 3.2. Функціональна схема пристрою визначення зміни меж пластів

Функціональна структура даного пристрою складається із двох рівнів: нижнього (рівень первинних давачів та контролерів) та верхнього (рівень комп'ютера). Даний пристрій розроблений на основі системи контролю СКУБ-М2, за допомогою якого проводиться вимірювання параметрів процесу буріння і подальша їх обробка [74].

Даний пристрій функціонує за таким принципом. Комплект первинних вимірювальних перетворювачів проводить вимірювання параметрів технологічного процесу і передає їх в пристрій збору і обробки даних. Пристрій збору і обробки даних проводить перевід отриманих параметрів в фізичні величини, масштабування і обмін з пультом контролю, блоком спостереження, реєстратором і пристроєм реєстрації в реальному часі, а також з'єднання по послідовному інтерфейсу (RS-485) з інтерфейсом (RS232/RS-485) для передачі даних в персональний комп'ютер. В комп'ютері отримані дані обробляються за двома алгоритмами (G та Z), після чого результати обробки відображаються на дисплеї ПК. Скориставшись приведеною на дисплеї ПК інформацією, оператор приймає рішення щодо процесу і дає відповідні вказівки робочому персоналу бурової установки.

Для визначення зміни меж пластів [75] буримості гірської породи безпосередньо в процесі буріння необхідно володіти наступною інформацією. Поточні значення проходки h_i в дискретні моменти часу t_i , з яких формується масиви $\{h_i\}$, $\{t_i\}$ вводяться від первинного перетворювача проходки системи контролю СКУБ-М2. Масив значень показника $\{L_i, i\}$ формується у відповідності з табл.3.3.

Із клавіатури мікропроцесорного пристрою вводяться основні параметри алгоритмів N , a , C , Δ , крім того в процесор вводяться алгоритми, що дають змогу обчислити G і Z – функції.

Таким чином, на основі методів визначення моментів зміни властивостей випадкових процесів розроблені алгоритми оцінки моменту зміни меж пластів гірських порід. На базі даних алгоритмів розроблено програмне і технічне забезпечення, яке на основі сучасної комп'ютерної техніки дає змогу

контролювати межі зміни буримості гірських порід і тим самим проектувати параметри режиму буріння і підвищувати ефективність бурових робіт.

3.3. Розбиття гірської породи на класи за буримістю на засадах штучних нейронних мереж

В процесі розробки автоматизованих систем контролю буримості гірських порід важливою задачею є розпізнавання класів буримості. Іншими словами, за відомими показниками буримості необхідно класифікувати породу, тобто віднести її до певного класу. Вважається, що число класів відомо. Ця задача відноситься до задач класифікації [89,95,96].

Нехай $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ вектор, який представляє сукупність ознак класифікації в n -вимірному просторі. Точку \bar{x} у цьому просторі називають об'єктом або образом.

Класифікація ґрунтується на прецедентах [89]. Прецедент – це образ, правильна класифікація якого відома. Будемо вважати, що всі об'єкти розбиті на кінцеве число класів. Для кожного класу відоме певне число прецедентів. Задача полягає у тому, щоб віднести новий об'єкт до певного класу.

Є два підходи до вирішення поставленої задачі.

Перший підхід ґрунтується на статистичній теорії розпізнавання образів [89,93]. Цей підхід має той недолік, що в більшості задач відсутня інформація про вид законів розподілу, про значення характеристик об'єктів, що вивчаються. Крім того статистичні методи розпізнавання образів вимагають значної кількості інформації. Оскільки, вони, як правило, ґрунтуються на байєсовському підході, то це тягне за собою значні обчислювальні затрати.

В основі другого підходу до розв'язання задачі класифікації об'єктів лежить теорія штучних нейронних мереж [82,90,92].

Для класифікації образів найчастіше використовують нейронні мережі Кохонена, Гроссберга та нейронні мережі зустрічного поширення. Останні представляють собою об'єднання у єдиній архітектурі нейронних мереж Кохонена і Гроссберга.

Мережі Кохонена функціонують у відповідності з алгоритмом, у якому реалізований принцип конкуренції. Згідно з цим принципом мережа ініціалізується шляхом надання нейронам певних позицій в просторі і зв'язуванням їх із сусідами на постійній основі. Тобто здійснюється функціонування мережі за правилом «переможець отримує все». Для вхідного вектора, який подається на вхід мережі, тільки один нейрон видає логічну одиницю; всі інші видають нуль. Вихід кожного нейрона Кохонена – це сума компонентів x_i вхідного вектора, взятих з певними вагами.

$$S_j = \sum_i x_i w_{ij} ,$$

де S_j – вихід j -го нейрону;

w_{ij} - ваги i -го компонента, віднесені до j -го нейрону.

«Переможець» визначається за правилом так $S_j = S_k = 1$; інші виходи $S_j = 0$, $j \neq k$.

Рівняння, яке описує процес навчання, має вигляд

$$\bar{w}_{new} = \bar{w}_{old} + \eta(\bar{x} - \bar{w}_{old}),$$

де \bar{w}_{new} - нове значення ваги, яке з'єднує вхідний компонент \bar{x} з нейронном «переможцем» (рис.3.4);

\bar{w}_{old} - попереднє значення цієї ваги;

η – коефіцієнт швидкості навчання.

Значення η на початку роботи мережі рекомендується вибирати рівним 0,7 і потім зменшувати в процесі навчання.

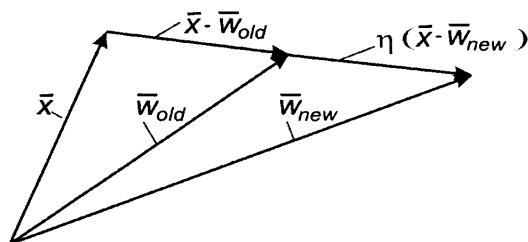


Рис. 3.3. Процес навчання мережі Кохонена

Нейронна мережа Гроссберга подібна до мережі Кохонена. Її вихід є зваженою сумою виходів шару Кохонена.

Якщо мережа Кохонена функціонує таким чином, що лише один вихід дорівнює одиниці, а інші дорівнюють нулю, то кожний нейрон Гроссберга видає величину ваги, який зв'язує цей нейрон з єдиним нейроном Кохонена, чий вихід відмінний від нуля.

Нейронні мережі зустрічного поширення включають в себе вхідний шар і шари нейронів Кохонена та Гроссберга (рис.3.4.)

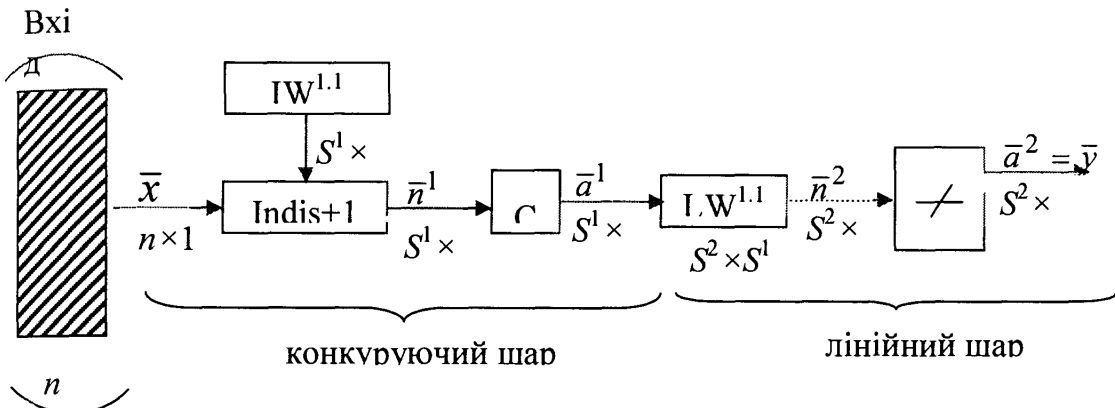


Рис. 3.4. Мережа зустрічного поширення

На вхід нейромережі подається вектор \bar{x} розміром $n \times 1$. На виході блоку *ndist* отримаємо вектор розміром $S^1 \times 1$, який визначається наступним чином:

$$n_i^1 = \left| \bar{x} - \bar{w}_i^{1.1} \right|^2,$$

де n_i^1 - компоненти вектор \bar{n}^1 розміром $S^1 \times 1$;

$\bar{w}_i^{1.1}$ - i -тий стовбець матриці $Iw^{1.1}$.

Сигмоїдальна функція C реалізує операцію «переможець одержує все» (рис.3.5). В результаті отримуємо вектор з компонентами

$$a_i^1 = 0, \forall i = 1, S^1, i \neq k; a_i^1 = 1, i = k.$$

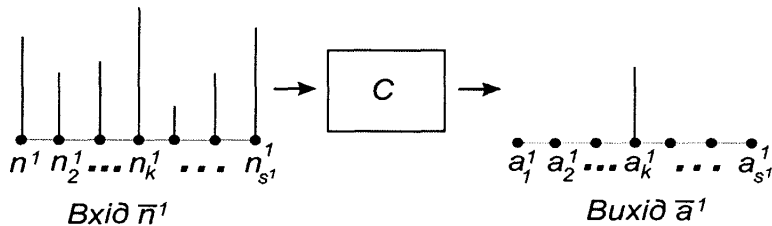


Рис. 3.5. Процес формування функції C «переможець одержує все»

При поданні на кожному такті навчання нового вхідного образу $\bar{x}(k)$ відбувається корекція ваг нейрона-переможця [90]

$$Iw_i^{1,1}(k) = Iw_i^{1,1}(k-1) - \eta(\bar{x}(k) - Iw_i^{1,1}(k-1)),$$

де $Iw_i^{1,1}$ - стовбці матриці $Iw^{1,1}$;

k - ий крок навчання.

Якщо сума ваг для кожного нейрона є постійною величиною і $|Iw_i^{1,1}|^2 \approx 1$, а вхідні вектори нормалізовані $|\bar{x}|^2 = 1$, то час навчання мережі може бути скорочений.

При виконанні, зазначених вище умов, щодо векторів $Iw_i^{1,1}$ і \bar{x} величина

$$\bar{y} = Iw^{1,1}\bar{a}^2$$

може використовуватись як критерій надійності образів $\bar{x}^{(1)}$ і $Iw_i^{1,1}$.

З метою класифікації гірських порід за буримістю здійснювалось навчання мережі за допомогою імітаційного моделювання. Початкова швидкість буріння v_0 моделювалась наступним чином:

$$v_0 = \hat{v}_0 + v_t, \quad (3.19)$$

де v_t – адитивна перешкода з нульовим математичним сподіванням.

Для встановлення виду функції густини розподілу використані дані, які отримані при бурінні свердловини Прутець 1; тип долота ТКЗ-190,5; глибина 4118 м; спосіб буріння – роторний. Параметри режиму буріння: осьове навантаження на долото: 160,3 кН; частота обертання долота: 1,08 с⁻¹. За результатами буріння був побудований графік проходки $h(t)$ (рис. 3.6), з якого видно, що за час буріння, який складає 0,37 год., зношення долота було незначним. Тому початкову швидкість буріння обчислювали за формулою

$$v_0^{(i)} = \frac{h(t_i) - h(t_i - \Delta t_i)}{\Delta t_i},$$

де $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $i = 2, 3, \dots, n$;

n – кількість відліків проходки $h(t_i)$ на інтервалі часу $[0; t_n]$.

Відповідним чином визначалась і адитивна перешкода

$$v_i = v_0^{(i)} - \hat{v}_0,$$

де $\hat{v}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_0^{(i)}$.

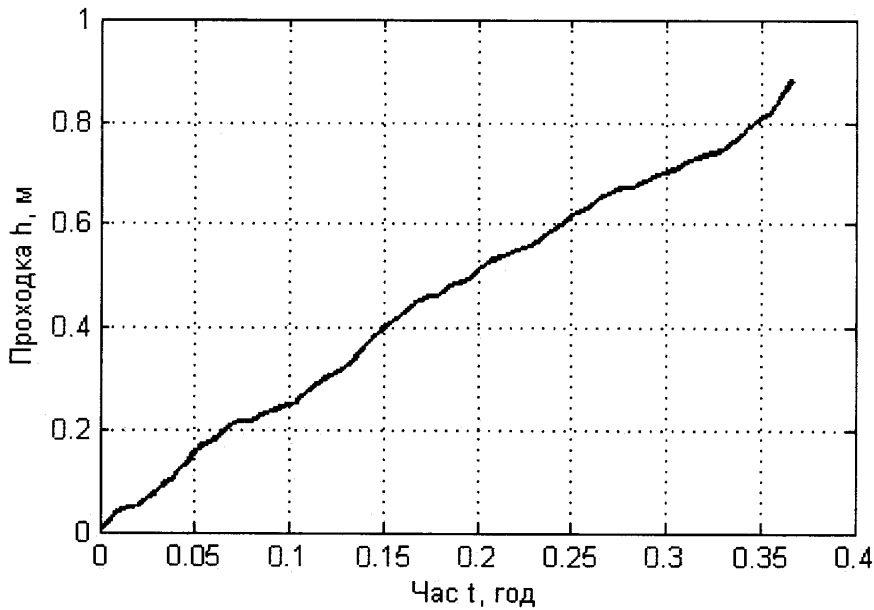


Рис. 3.6. Зміна у часі t проходки h

Графік залежності v_i показаний на (рис.3.7). Використовуючи отримані дані, була побудована гістограма випадкової величини v_i (рис. 3.8). Для перевірки гіпотези про відповідність експериментальних даних нормальному закону розподілу був використаний χ^2 -критерій, який обчислюється за такою формулою:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (3.20)$$

де k – кількість розрядів статистичного ряду;

m_i – число попадань випадкової величини в i -тий розряд;

n – розмірність масиву значень p_i ;

p_i – ймовірність попадання випадкової величини v_i в i -тий розряд.

Значення p_i обчислимо за формулою:

$$p_i = P(\alpha_{v,i} < V < \beta_{v,i}) = P(\beta_{v,i}) - P(\alpha_{v,i}),$$

де $\alpha_{v,i}$, $\beta_{v,i}$ – нижня і верхня межі i -го розряду;

$P(\alpha_{v,i})$, $P(\beta_{v,i})$ – значення функції розподілу випадкової величини v_i при $V = \alpha_{v,i}$ і $V = \beta_{v,i}$.

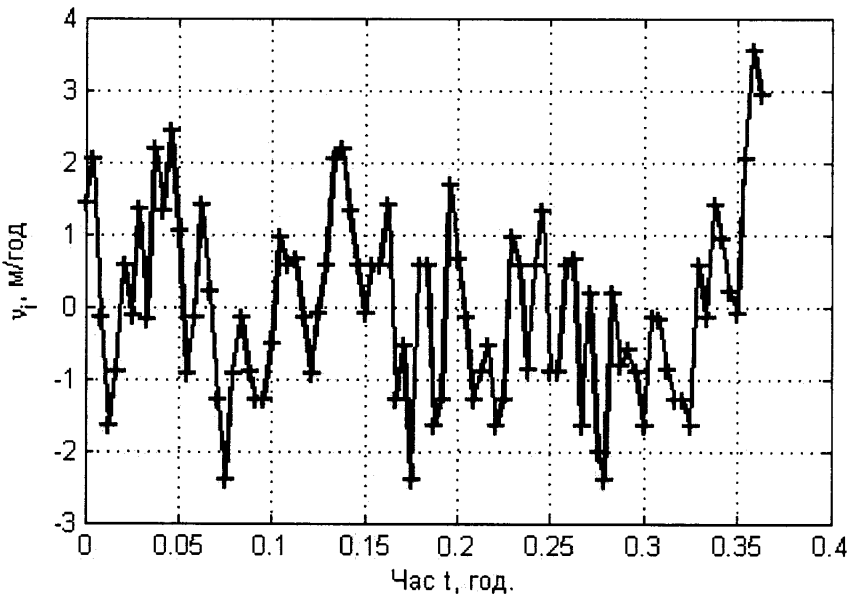


Рис. 3.7. Зміна у часі t механічної швидкості буріння v_i

Обчислене значення χ^2 за формулою (3.20) є таким:

$$\chi^2 = 7,69.$$

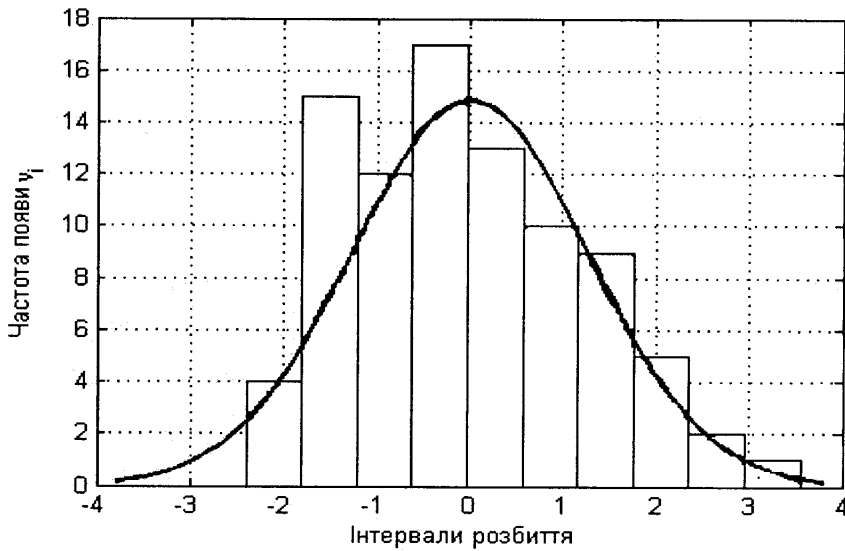


Рис. 3.8. Гістограма побудована для механічної швидкості буріння

Допустимо, що висувається гіпотеза H_0 : експериментальні дані v_i розподілені за нормальним законом:

$$p(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}},$$

де σ_v^2 - дисперсія випадкової послідовності v_i .

Для того, щоб гіпотеза H_0 була вірною, необхідне виконання умови

$$p(\chi^2 \leq U) = 1 - \alpha,$$

де U - значення величини, яке визначається із умови

$$U = p^{-1}(p, r),$$

де $p^{-1}(p, r)$ – функція обернена χ^2 -розподілу;

$p = 1 - \alpha$; α – рівень значущості критерію;

$r = k - s$; s – кількість зв'язків, які необхідно накласти, щоб вичислити параметри розподілу величини v_i таких зв'язків три: математичне сподівання, дисперсія і умова нормування $\sum_i p_i^* = 1$; p_i^* - частота i -го розряду.

Було взято $p = 0,95$; $r = k - 3$; $k = 10$. В результаті отримано, що $U = 14,067$. Оскільки виконується умова $\chi^2 < U$, то з ймовірністю $p = 0,95$ гіпотеза H_0 приймається. Параметри нормального розподілу $m = 0$ і $\sigma_v = 1,2673$ м/год.

Знаючи закон розподілу випадкової величини v і його параметри, будемо генерувати випадкову послідовність \tilde{v}_0 згідно рівняння (3.19). Значення \tilde{v}_0 вибирають із масиву $\tilde{v}_0 \in \{2,6; 3,7; 4,9; 7,1; 10,2\}$.

Було вибрано 5 класів. Мережа навчалась на об'ємі вибірки, який дорівнював 250. Класифікація згенерованих векторів здійснювалась за допомогою LVQ-мережі [90,92], кількість нейронів якої обчислювалась за формулою:

$$L = \frac{L_w}{n + m},$$

де L_w – число синоптичних ваг у нейромережі, яке визначається згідно наступної формули:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m,$$

де n, m – відповідно розмірності вхідного і вихідного сигналів;

N – число елементів навчальної вибірки.

Наведені формули визначають кількість нейронів мережі у досить широкому діапазоні. Тому вибір числа нейронів проводився шляхом послідовного підбору з тим розрахунком, щоб забезпечити необхідну ймовірність класифікації гірських порід за буримістю.

Тестування мережі показало, що після навчання, мережа правильно виконала класифікацію (рис. 3.9, а). Як приклад на (рис. 3.9, б) наведено результат класифікації вектора $\tilde{v}_0(t)$ зі значенням $\tilde{v}_0=3,7$ м/год і $\sigma_v=0,98$. Видно, що мережа віднесла його до другого класу.

$$\begin{array}{cc}
 \begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 Y=0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{array} &
 \begin{array}{ccccc}
 Y=0 & 1 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \\
 a) & b)
 \end{array}$$

Рис. 3.9. Результат тестування мережі (а) і віднесення вектора $\tilde{v}_0(t)$ до певного класу (б)

Для визначення ймовірності правильної класифікації властивостей гірських порід за буримістю проводився імітаційний експеримент. Були взяті значення \tilde{v}_0 , які наведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Значення \tilde{v}_0 , які використовувались в імітаційному експерименті

\tilde{v}_0 , м/год	2,7	3,9	4,5	7,3	9,9	Середнє значення ймовірності
Ймовірність	0,89	0,93	0,92	0,95	0,94	0,926

Для кожного із п'яти значень \tilde{v}_0 проводилось 100 імітаційних експериментів. Значення ймовірності віднесення вектора $\tilde{v}_0 = \tilde{v}_0 + \bar{v}$ до певного класу зведені у табл. 3.7. Середнє значення ймовірності - 0,926.

Таким чином, нейронна мережа зустрічного поширення дає змогу з ймовірністю 0,92 здійснювати правильну класифікацію за початковою швидкістю буріння навіть при високому рівні шумів.

3.4. Вибір частоти дискретного контролю буримості гірських порід

У зв'язку з тим, що в системі контролю буримості гірських порід опитування датчиків відбувається циклічно, треба визначити частоту їх опитування.

Під час реєстрації механічної швидкості проходки, важливо знати усереднені її значення за деякий проміжок часу. Частота вимірювань їх може бути обрана на основі оцінки середнього квадратичного відхилення σ контрольованої величини в часі, яку можна прийняти за похибку апроксимації [80].

Отже, визначення допустимої частоти дискретних вимірювань середньої механічної швидкості буріння проведемо, користуючись значенням середньої квадратичної похибки апроксимації σ і оцінкою автокореляційної функції контрольованої величини $R_{v_0 v_0}(\tau)$.

Для цього використаємо ступінчасту апроксимацію $\bar{v}_0(t)$ вимірюваних функції $v_0(t)$. Слід зазначити, що значення контрольованої величини у будь-який момент часу t , який належить інтервалу

$$T_i \leq t \leq t_{i+1},$$

приймається рівним t_i і змінюється стрибком на $\Delta \bar{v}_{0i} = \Delta \bar{v}_{0i+1} - \Delta \bar{v}_{0i}$ в момент вимірювань t_{i+1} .

Отже, за даним критерієм дискретності відліку середнього значення механічної швидкості буріння у будь-який момент часу повинна виконуватися нерівність

$$\sigma^2 \geq M \left(\bar{v}_0(t) - v_0(t) \right)^2, \quad (3.28)$$

де $v_0(t)$ - центрований випадковий стаціонарний процес.

Враховуючи, що $v_0(t) = \bar{v}_0 + v_t^0$ і $\bar{v}_0 = M[v_0]$, формулу (3.28) перепишемо у такому вигляді

$$\sigma^2 \geq 2[R_{vv}(0) - R_{vv}(t - t_i)]. \quad (3.29)$$

Нерівність (3.29) приймає вигляд рівності в моменти відліку t_i . Отже, замінивши різницю $t - t_i = \tau_0$ і підставивши замість значень автокореляційної функції їх оцінки, отримаємо остаточний вираз, який зв'язує задану середню квадратичну похибку σ з інтервалом дискретності вимірювань.

$$\sigma^2 \geq 2[R_{vv}(0) - R_{vv}(\tau_0)]. \quad (3.30)$$

Із рівняння (3.30) маємо

$$R_{vv}(\tau_0) = R_{vv}(0) - \frac{\sigma^2}{2}. \quad (3.31)$$

Формула (3.31) зв'язує інтервали часу дискретних вимірювань із заданою похибкою апроксимації за допомогою оцінки фіксованих точок автокореляційної функції $v_0(t)$. Для розрахунку частоти вимірювань була використана реалізація механічної швидкості буріння $v(t)$, яка була отримана експериментальним шляхом в процесі буріння свердловини № 86 Прикарпатського УБР.

Графік зміни механічної швидкості буріння $v(t)$ в породах стабільної буримості наведено на рис.3.10.

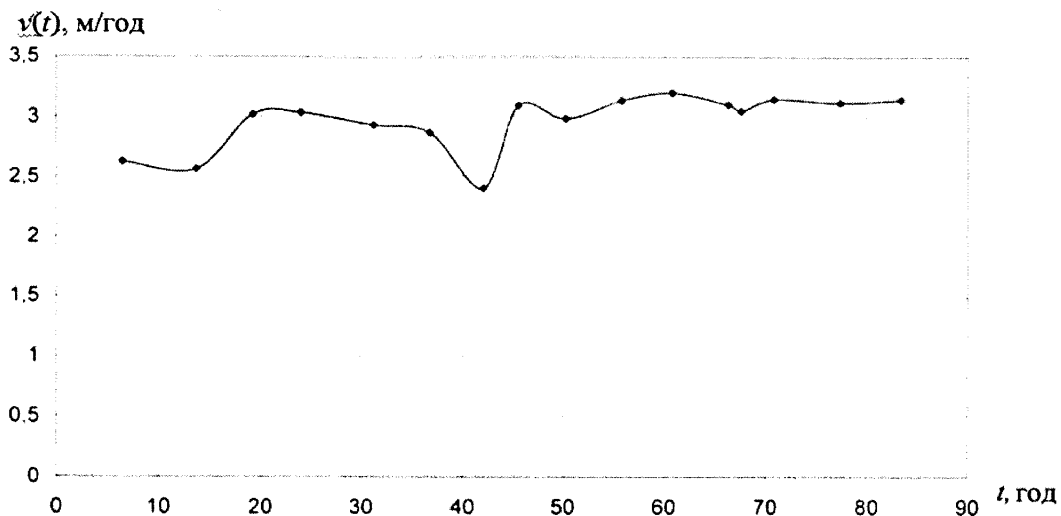


Рис.3.10. Графік зміни механічної швидкості буріння $v(t)$ в часі при бурінні з постійною осьювою силою на долото $F=196$ кН (свердловина № 86, долото ШУ295,3 СЗГ, інтервал 2925-3118 м, $Q=0,25 \cdot 10^{-3}$ м³/с, тип породи Бистрицька світа)

Аналіз реалізації $v(t)$ дозволив встановити, що вона відповідає нормальному закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова і максимальне середнє

квадратичне відхилення $\sigma_{\max} = 0,467$, оцінка генеральної дисперсії $S^2 = 0.218$.

Тоді

$$R_{VV}(\tau_0) = R_{VV}(0) - \frac{\sigma^2}{2} = 1 - \frac{0,218}{2} = 0,891.$$

Із графіка (рис. 3.11) $R_{V_0V_0}(\tau)$ видно, що при $R_{V_0V_0}(\tau) = 0,891$ крок дискретизації для дискретного контролю середнього значення механічної швидкості буріння складає $\Delta t = 12$ хв.

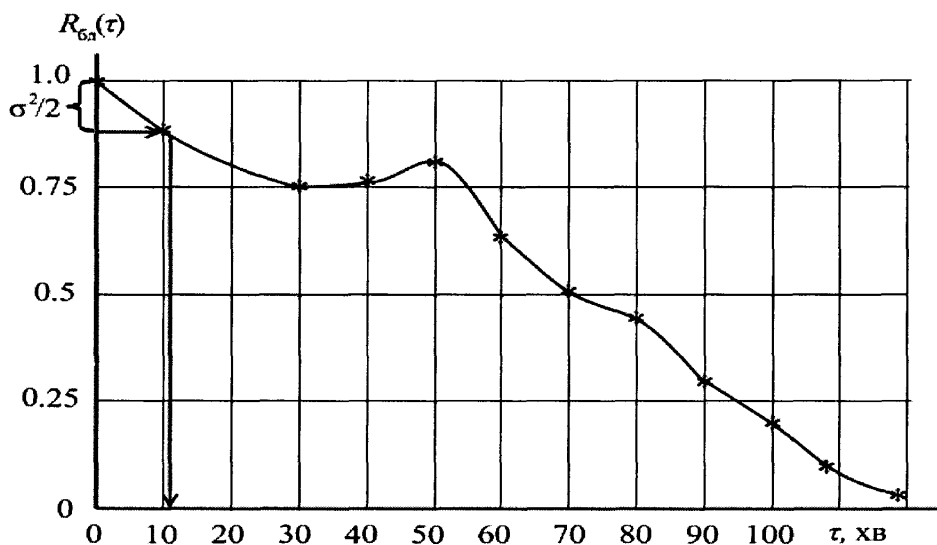


Рис. 3.11. Нормована автокореляційна функція середньої механічної швидкості буріння в породах стабільної буримості

Тобто для забезпечення ефективної роботи системи автоматизованого контролю буримості гірських порід достатньо, щоб крок дискретизації не перевищував 12 хвилин.

3.5. Прогнозування швидкості буріння на основі штучних нейронних мереж

Natural Analyzer 3,0 – є програмним емулятором нейронної мережі. Програма дозволяє:

- одержати повчальну вибірку з будь-якого джерела;

- визначити конфігурацію нейронної мережі і навчити мережу за допомогою майстра навчання;
- зберігати навчену мережу і використовувати її надалі;
- використовувати одержану модель для аналізу даних.

Ця нейронна мережа з успіхом застосовується для вирішення наступних класів задач:

- моделювання;
- прогнозування;
- пошук закономірностей у великих об'ємах даних;
- виявлення набору незалежних ознак;
- стиснення інформації.

Нейронні мережі зворотнього розповсюдження – найпотужніший інструмент пошуку закономірностей, прогнозування, якісного аналізу. Таку назву – мережі зворотного розповсюдження (back propagation) – вони одержали через алгоритм навчання, в якому помилка розповсюджується від вихідного шару до вхідного, що використовується, тобто в напрямі, протилежному напрямку розповсюдження сигналу при нормальному функціонуванні мережі.

На механічну швидкість буріння впливають наступні чинники: осьова сила на долото F (кН), швидкість обертання долота n (хв⁻¹), кількість прокачувальної рідини Q (л/с), фізико-механічні властивості промивальної рідини і породи, а також характеристики породоруйнівних елементів долота. Механічна швидкість при забезпеченому процес буріння кількості промивної рідини визначається за формулою:

$$v_{0, мех} = a \cdot F^{\delta} \cdot n^{\alpha} . \quad (3.32)$$

де a , δ , α – параметричні коефіцієнти, які встановлюються за результатами буріння і враховують фізико-механічні властивості промивної рідини і породи, ступінь очищення вибою від вибурених порід, а також особливості конструкції породоруйнівних елементів доліт.

Як приклад розглянемо процес буріння свердловини в інтервалі 3600-3700м на 15 родовищах Стрийського УБР. Процес буріння, в більшості випадків, здійснюється при постійній осьовій силі F та частоті обертання долота n . В нашому випадку $F=18\text{кН}$ і $n=60\text{ об/хв}^{-1}$.

Як модель нейронної мережі взята лінійна тришарошкова мережа, зображена на рисунку 3.12, яка реалізована на базі програмної системи Neural Analyzer 3.0.

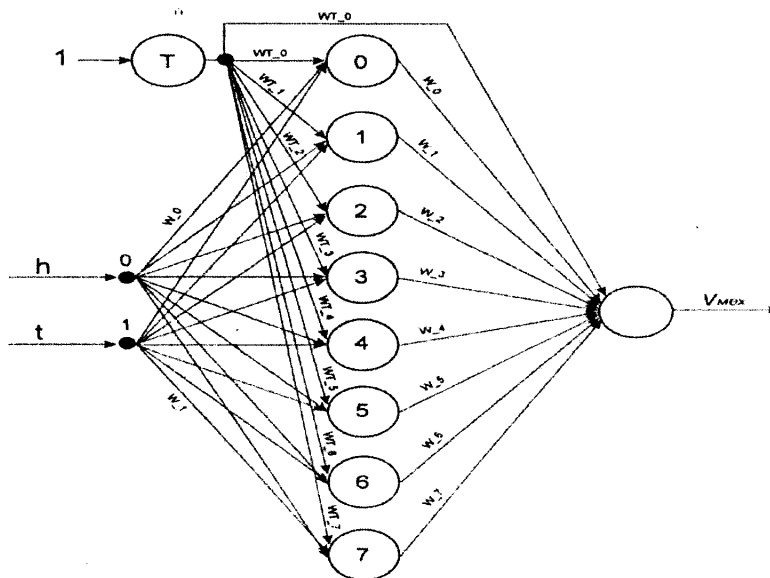


Рис. 3.12. Архітектура нейронної моделі для прогнозування механічної швидкості буріння

Основні параметри нейронної моделі: входні поля: h – глибина буріння; t – час буріння; цільові поля: $V_{\text{мех}}$. Параметри навчання: 1) алгоритм навчання – back-propagation; 2) активаційна функція – сигмоїда (крутизна сигмоїди: 1,00); 3) момент – 0,90; 4) швидкість навчання – 0,10; 4) середня квадратична помилка $< 5,00\text{E}$; 6) повчальна множина - 80%; 7) тестова множина – 20%. Конфігурація мережі; 1) вхід 0 – нейронів 2; 2) шар 1 – нейронів 8; 3) вихід 2 – нейронів 1.

Вага:

Шар 1, нейрон 0

$$W_0 = -3,9151430600607\text{E}+000$$

$$W_1 = 1,6446539474591\text{E}+000$$

$$WT_0 = -1,65452857200795\text{E}+000$$

нейрон 1

$$W_0 = -3,9151430600607E-001$$

$$W_1 = 1,60894754396510E+000$$

$$WT_1 = -2,27517002198387E+000$$

нейрон 2

$$W_0 = -3,23304841537832E+000$$

$$W_1 = 4,66163476044347E+000$$

$$WT_2 = -3,08105534036437E-001$$

нейрон 3

$$W_0 = 2,28824611764700E-001$$

$$W_1 = -3,56481931849625E+000$$

$$WT_3 = -1,4528995155412E+000$$

нейрон 4

$$W_0 = 2,16359842682433E-001$$

$$W_1 = 6,27941194399085E+000$$

$$WT_4 = 6,69566373076076E+000$$

нейрон 5

$$W_0 = -6,06891365498229E-001$$

$$W_1 = 3,74153594634517E+000$$

$$WT_5 = -3,12104222571156E+000$$

нейрон 6

$$W_0 = 2,28884183877111E-001$$

$$W_1 = 3,27311829879992E+000$$

$$WT_6 = -2,71395894867059E+000$$

нейрон 7

$$W_0 = 6,24229102880266E-001$$

$$W_1 = 1,10644786233043E+000$$

$$WT_7 = -1,99005354581425E+000$$

Шар 2

нейрон 0

$$W_0 = -6,33736618716630E-001$$

$$W_1 = -5,72275539089133E-001$$

$$\begin{aligned}
 W_2 &= 8,17345055022073E-001 \\
 W_3 &= 1,80668951635747E+000 \\
 W_4 &= -6,1330588031738E+000 \\
 W_5 &= -3,22110805321312E+000 \\
 W_6 &= -3,08402827042283E+000 \\
 W_7 &= -7,41272299334562E-001 \\
 WT_0 &= 5,66803872843983E+000
 \end{aligned}$$

Як «навчальну множину» нейронної мережі використані експериментальні дані, приведені у додатку Г.

Для порівняння деякі результати роботи нейронної мережі і експериментальні дані приведені в додатку Ш.

За наслідками додатку Г побудовані порівняльні діаграми зміни механічної швидкості буріння. Аналіз отриманих результатів показує велику ефективність використання нейронних мереж. За допомогою розглянутої моделі можна прогнозувати подальший розвиток процесу буріння свердловини, порівнювати з її реальними характеристиками, що дозволяє визначити буримість порід, якість очищення вибою свердловини, знос доліт ті ін.

На рис.3.13 наведено діаграму зміни коефіцієнта буримості K_b , механічної швидкості буріння V і відносного зносу долота ε , а на рис.3.14 – алгоритм прогнозування механічної швидкості буріння і буримість гірських порід.

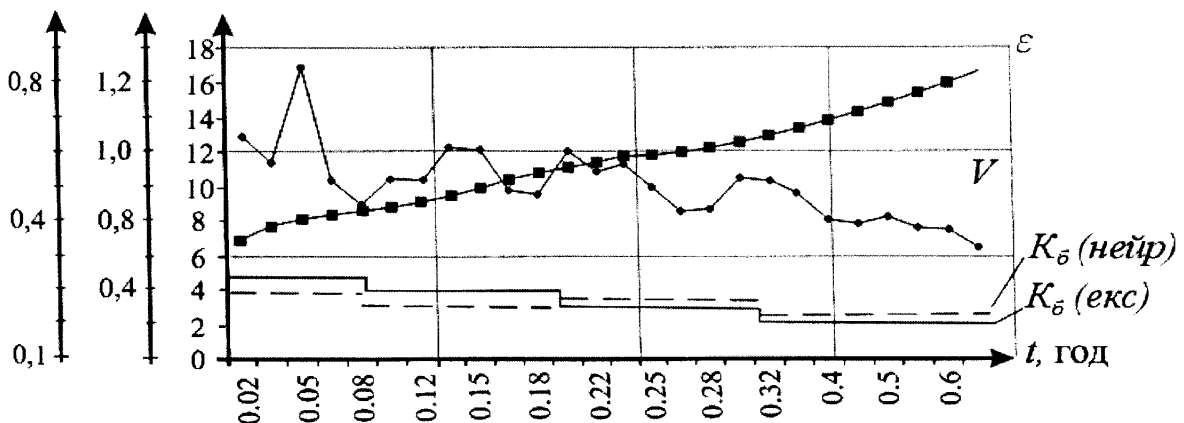


Рис.3.13 Діаграма зміни коефіцієнта буримості K_b , механічної швидкості буріння V і відносного зносу долота ε (бурова Спас-120, $H = 3030-3137$ м, $P = 196$ кН, $n = 1$ с⁻¹)



Рис. 3.14. Алгоритм прогнозування механічної швидкості буріння і буримості гірських порід

Розроблена автоматизована система визначення буримості гірської породи безпосередньо в процесі буріння. Дана система реалізована із використанням сучасної вітчизняної системи наземного контролю процесу буріння нафтових і газових свердловин БУР-САК (ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ) і розроблених програмного і алгоритмічного забезпечення визначення буримості гірських порід (рис.3.15) [85].

Інформація про поточні значення параметрів і показників процесу буріння від первинних вимірювальних перетворювачів, які змонтовані на технологічному обладнанні бурової установки, через пристрої збору і обробки даних поступає в мікропроцесор ПК, куди і вводиться програма, що по чергово реалізує наступні три алгоритми:

1. Буримість визначається за формулою

$$K_b \cdot 10^{-5} = \frac{h}{t_\delta \cdot F \cdot n}, \quad (3.33)$$

де F – осьова сила на долото;

n – швидкість його обертання;

h – проходка на долото;

t_δ – час буріння.

2. Буримість визначається відношенням потужностей, що витрачаються на просування породоруйнівного інструменту вздовж стовбура свердловини, до потужності, що йде на руйнування гірської породи, тобто

$$K_{\sigma} = \frac{F \cdot n \cdot d}{N}, \quad (3.34)$$

де d – діаметр долота;

N – потужність, яка витрачається на руйнування гірської породи.

3. Буримість визначається за швидкістю зміни відножного зносу озброєння долота і механічної швидкості буріння $V_{\text{мех}}$, тобто

$$K_{\sigma} = \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^{-1}, \quad (3.35)$$

де ε – відносний знос озброєння долота.

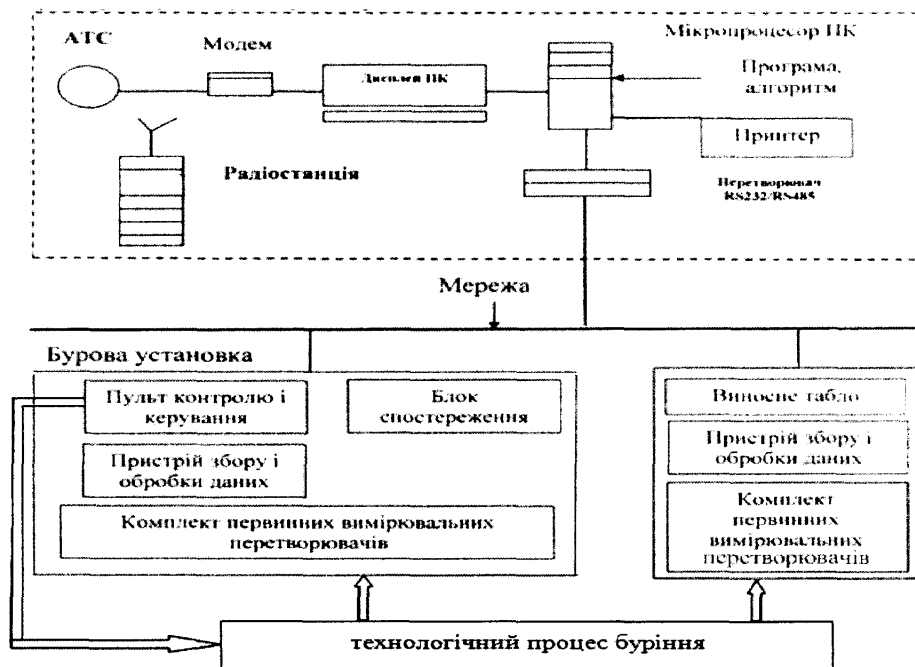


Рис.3.15. Автоматизована система визначення буримості гірської породи безпосередньо в процесі буріння свердловини

Перед початком буріння в пам'ять мікропроцесора ПК вводяться алгоритми і програма, які на основі поточної технологічної інформації про процес буріння, визначають коефіцієнти буримості. Оператор аналізує дані і дає

рекомендації буровику-технологу щодо корегування режимних параметрів буріння.

Таким чином, використання сучасних систем збору і обробки даних про технологічний процес [83,85,86], мікропроцесорних засобів ПК, програмного забезпечення і алгоритмів дають змогу визначити коефіцієнти буримості гірської породи безпосередньо в процесі буріння свердловин на нафту і газ, і оптимізувати режими буріння. Отримані результати можуть бути використані при бурінні свердловини на тверді корисні копалини і також при бурінні свердловин на шельфі Азовського і Чорного морів.

3.6. Вірогідність визначення меж залягання гірських порід різної буримості

Межі залягання гірських порід різної буримості контролюються за величиною коефіцієнта буримості K_6 і базової швидкості буріння V_0 .

Постановка задачі швидкого виявлення моменту переходу долота в породи іншої буримості передбачає наявність інформації про ймовірність хибної тривоги

$$p_x(t_\alpha < t_0) \leq \alpha,$$

де α – задана константа $0 \leq \alpha \leq 1$.

Стан об'єкта можна контролювати, користуючись інформацією про величину двох показників

$$x_i(t), i = 1, 2, \dots,$$

які приймають значення із двох можливих областей:

ω_{1i} – область допустимих значень, яка відповідає нормальному стану об'єкта на i -й величині;

ω_{2i} – область значень, яка відповідає неприпустимим станам об'єкта.

Норми або межі, що розділяють області станів ω_{1i} і ω_{2i} задаються технічними умовами на функціонування процесу будівництва свердловин.

Головна операція контролю у цьому випадку – це перевірка виконання умови:

$$x_{ai} \leq x_i(t) \leq x_{bi} \quad (3.36)$$

для кожної контрольованої величини і для будь-якого моменту часу.

В (3.36) x_{ai} і x_{bi} – відповідно нижнє і верхнє значення норми.

Величина $x_i(t)$ відома з деякою похибкою ξ , яка визначається похибками спостереження і алгоритмічного ланцюга. У зв'язку з цим відбувається неоднозначна відповідність стану об'єкта і результатів контролю.

У загальному випадку можливі чотири варіанти результатів, які є несумісними подіями і перелічені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Перелік станів об'єкта, результатів контролю і ймовірностей результату контролю

Стан об'єкта	Результат контролю	Ймовірність результату контролю
ω_1	ω_1	$p(1/1) = p_1$
ω_1	ω_2	$p(2/1) = p_x$
ω_2	ω_1	$p(1/2) = p_n$
ω_2	ω_2	$p(2/2) = p_2$

Ймовірність $p_{вк} = p(1/1) + p(2/2)$ відповідає вірному, $p_{нк} = a + p_n$ – невірному результату контролю, Окрім того, $p_{вк} + p_{нк} = 1$. Ймовірність p_x будемо називати ймовірністю хибної тривоги, а p_n – ймовірністю невизначеної відмови або пропуском порушення.

Для обчислення значення ймовірностей p_x і p_n необхідно знати густину розподілу $f(x-x_n)$ конкретних значень контрольованої величини x_i відносно номінального значення x_n ; $y(f)$ – густину розподілу похибки ξ ; координати нижньої δ_a і верхньої δ_b границь поля допуску відносно номінального значення x_n : $\delta_a = x_a - x_n$; $\delta_b = x_b - x_n$.

Приймач такої системи контролю складається з двох елементів – підсилювача 1 і логічного порогового елемента 2 (рис.3.16).

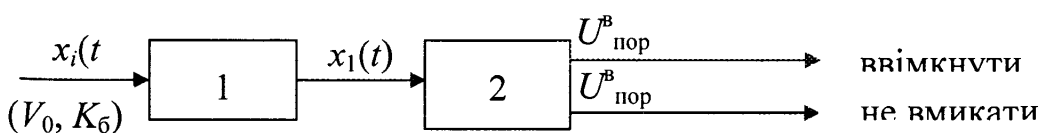


Рис. 3.16 .Функціональна схема приймача пристрою контролю буримості гірських порід

За допомогою підсилювача здійснюється підсилення сигналу $V_0(t)$ або $K_6(t)$, що поступає з виходу обчислювального пристрою системи контролю.

За допомогою логічного порогового елемента сигнал $x_1(t) = U(t) + U_n(t)$ на основі відомого критерію відноситься до тієї чи іншої команди. Тут $U(t)$ – корисний сигнал на виході пристрою контролю, $U_n(t)$ – перешкода. Наприклад, якщо рівень сигналу $x_1(t)$ зменшується нижче порогового значення $U_{\text{пор}}^{\text{н}}$, або збільшується вище порогового $U_{\text{пор}}^{\text{в}}$, то з виходу логічного елемента видається команда «ввімкнути», якщо $U_{\text{пор}}^{\text{в}} < x_1(t) < U_{\text{пор}}^{\text{н}}$, то видається команда «не вмикати».

Отже, $U_{\text{пор}}^{\text{в}} < x_1(t) < U_{\text{пор}}^{\text{н}}$, що відповідає команді «не вмикати», то на вхід приймача впливають лише перешкоди. Останні підсилюються по амплітуді лінійним підсилювачем і поступають на вхід електронного поляризованого реле. Коли рівень перешкод досягне порогового значення $U_{\text{пор}}^{\text{в}}$ або $U_{\text{пор}}^{\text{н}}$, то реле спрацює і видасть хибну команду «ввімкнути». Цей процес створення хибної команди пояснюється графіками, що наведені на рис.3.17. Практично це означає, що система контролю буримості зафіксувала пропласток гірської породи потужністю 4м з більшою міцністю ніж однорідна пачка порід, що розбурюється. Схему процесу пропуску двох порушень зображено на рис.3.18.

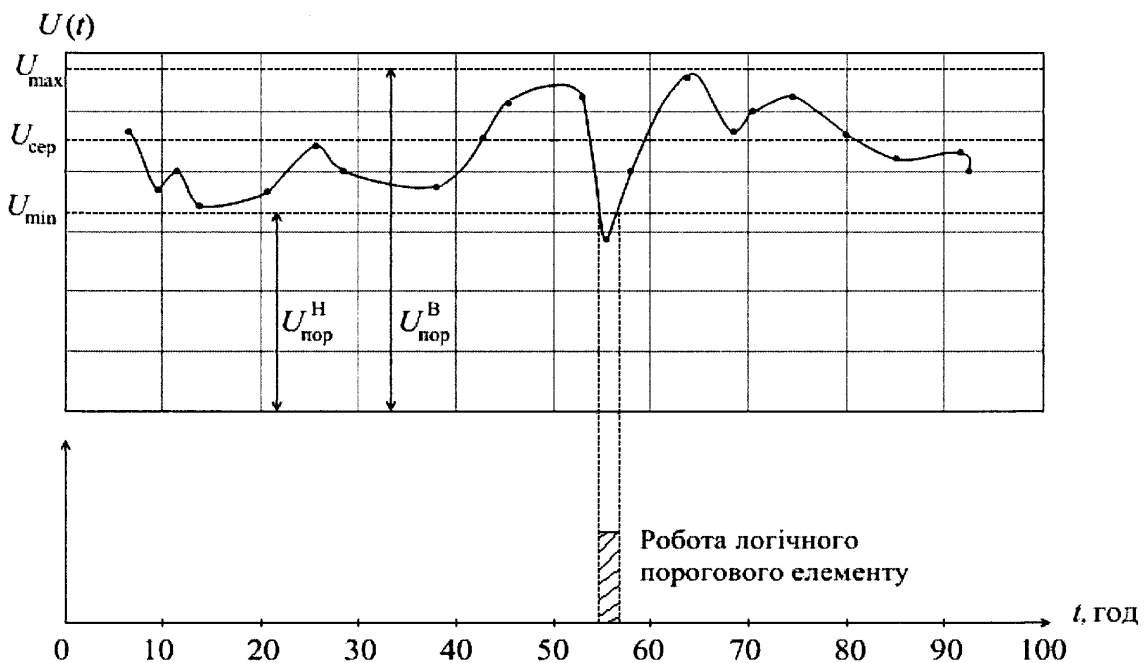


Рис.3.17. Схema процесу створення хибних команд

На цьому ж графіку між 20 і 30 годинами буріння зафіксовано перехід долота в пласт м'яких порід потужністю 7,5 м. Проте, після 50 годин спостерігається стабільний перехід долота в породи гіршої буримості.

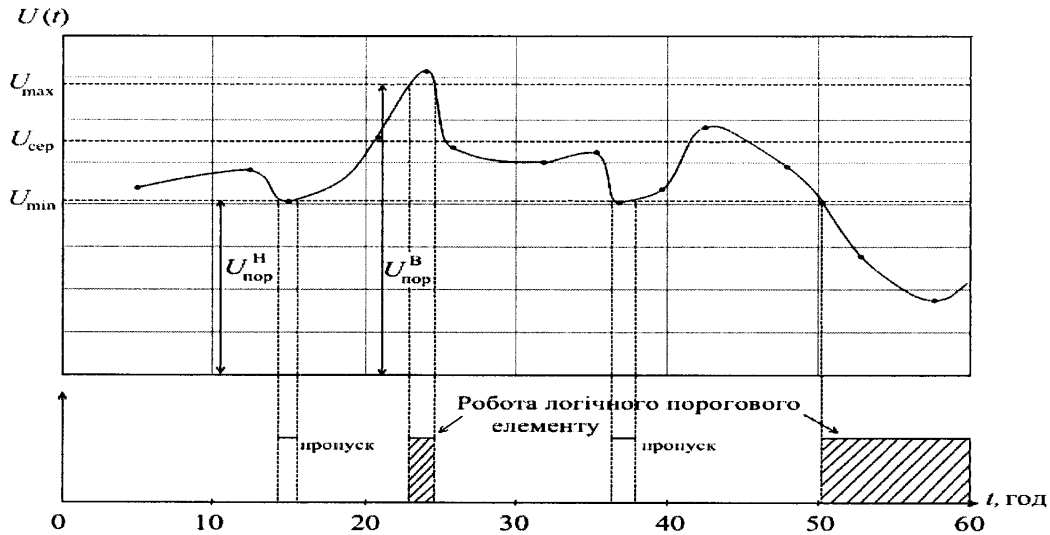


Рис.3.18.Схема процесу пропуску розлагодження і створення хибної

команди

Бачимо, що невірний результат контролю буримості залежить від порогового рівня логічного елементу і від співвідношення між рівнями корисного сигналу і перешкод. Припускаючи, що перешкоди $\varphi(\xi)$ у вимірювальному каналі підпорядковуються закону нормального розподілу, розрахуємо ймовірності хибної тривоги p_x і пропуску розладки p_H , які треба знати, щоб розрахувати вірогідність контролю.

Розглянемо випадок, коли x і ξ розподілені за нормальними законом (рис.3.19) з середніми значеннями m_x , $m_\xi=0$ і середніми квадратичними відхиленнями σ_x і σ_ξ . Якщо виконується умова $\xi \leq x_B - x_a$, ймовірність p_H і p_x можна оцінити за наближеними формулами [118]:

$$p_H \approx \frac{\sigma_\xi}{2\pi\sigma_x} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{K_B^2}{2}\right) + \exp\left(-\frac{K_a^2}{2}\right)}{\Phi(K_B) - \Phi(K_a)}, \quad (3.37)$$

$$p_x \approx (F(x_B) - F(x_a))p_H,$$

$$\text{де } K_a = \frac{x_a - m_x}{\sigma_x}; \quad K_b = \frac{x_b - m_x}{\sigma_x}; \quad \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

$F(x)$ – інтегральний закон нормального розподілу.

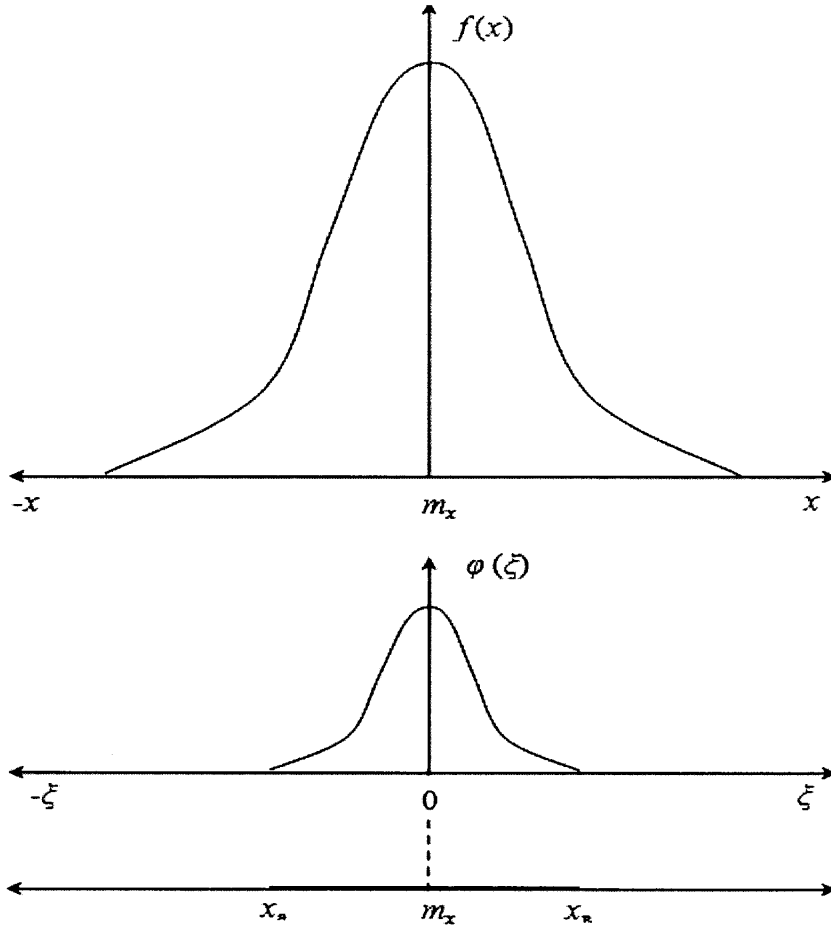


Рис. 3.19. Графіки розподілу контрольованої величини $f(x)$ і похибки $\varphi(\xi)$

Оскільки межі поля допуску x_a і x_b симетричні відносно математичного сподівання m_x , то $K_a = K_b = K$ і формула (3.37) суттєво спрощується

$$P_H \approx \frac{\sigma_\xi}{2\pi\sigma_x} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{K^2}{2}\right)}{\Phi(K)}. \quad (3.38)$$

В роботі [115] ймовірності хибних повідомлень p_x про зміну буримості гірських порід зщ запропоновано вибирати, користуючись рівнем значущості $\sigma=0,1$.

Оскільки, як було доведено в розділі 3 показник буримості V_0 розподілений за нормальним законом з середнім значенням $V_{0 \text{ сер.}}$ і середнім квадратичним

відхиленням σ_{V_0} , ймовірності p_H і p_X можна оцінити за наближеними формулами [119]:

$$p_X = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\beta}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = V\left(\frac{U_{пор}}{U_{п.еф.}}\right) = V(\beta), \quad (3.39)$$

$$p_H = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U_m - U_{пор}}{U_{п.еф.}}}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = V\left(\frac{U_{пор}}{U_{п.еф.}} - \beta\right), \quad (3.40)$$

де $\beta = U_{пор} / U_{п.еф.}$;

$U_{пор}$ - порогове значення логічного елементу;

$U_{п.еф.}$ - ефективне значення перешкод $U_{п}$ за умови, що їх середнє значення прийнято рівним нулю ($U_{п.еф.} = 0$) і середньоквадратичне відхилення відповідає їхньому ефективному значенню, тобто $\sigma = U_{п.еф.}$;

$Z = U_{п} / U_{п.еф.}$;

U_m - амплітудне значення імпульсу корисного сигналу.

Конкретні значення інтегралу ймовірності $V(\beta)$ для різних β можна визначити користуючись таблицями або графіком, наведеними на рис.3.20.

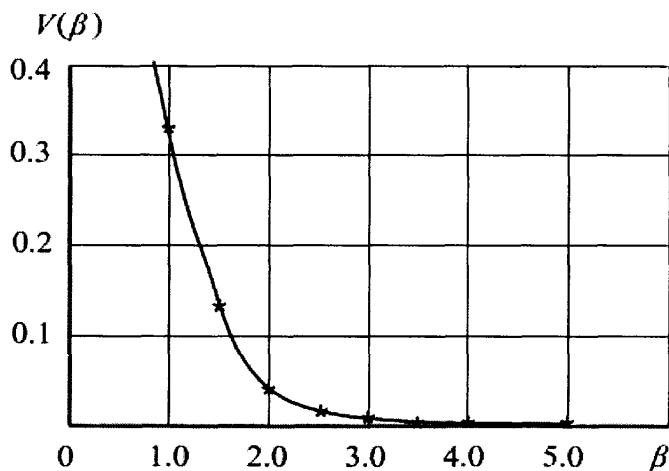


Рис.3.20. Графік залежності інтегралу $V(\beta)$ від значень β

Графік $V(\beta)$ дозволяє за відомими відношеннями

$$U_{пор} / U_{п.еф.} = U_{пор} / \sigma = \beta$$

визначити ймовірність хибної тривоги за даними експериментальних досліджень.

За даними експериментальних досліджень ефективно значення перешкод дорівнює $U_{п.еф} = 0,75$, а порогове значення логічного елемента $U_{пор} = 8$.

$$\text{Тоді } \beta = U_{пор} / U_{п.еф} = 8 / 0,75 = 10,66.$$

Такому значення β , згідно рис. 3.20 відповідає ймовірність хибної команди $p_x = V(\beta) = 10^{-7}$.

Слід зазначити, що ймовірність пропуску розлагодження p_n залежить як від співвідношення рівня сигналу і перешкоди ($U_m / U_{п.еф}$), так і від коефіцієнта β , який визначає ймовірність хибних команд. Пропуск розлагодження відбувається тоді, коли сумарна напруга сигналу і перешкоди буде меншою від порогового значення $U_{пор}$ релейного елемента. Ймовірність такої події визначається формулою (3.40).

Окрім того, тепер можна визначити ймовірність пропуску порушення, для чого необхідно визначити відношення $U_m / U_{п.еф}$, яке є сталою величиною. Для даного вимірювального каналу $U_m / U_{п.еф} = 10 / 0,75 = 13,3$. Отже тоді маємо

$$\left(\frac{U_{пор}}{U_{п.еф}} - \beta \right) = 13,3 - 10,66 = 2,64.$$

Користуючись рисунком 3.20 визначимо зменшення ймовірності пропуску розлагодження $p_n = 0,008$. Це означає, що на 1000 розлагоджень, які можуть статися під час буріння свердловини, буде припадати 8 розлагоджень, які будуть пропущені. Із рівняння (3.39) видно, що ймовірність пропуску розлагодження p_n залежить від рівнів сигналів ($U_m / U_{п.еф}$) і коефіцієнту β , який визначає ймовірність появи помилкових рішень. При цьому ймовірність p_n зростає із зменшенням ймовірності p_x , оскільки β збільшується. Таким чином, розглянуті показники заводостійкості є суперечливими, оскільки покращення одного показника тягне за собою погіршення іншого. Вказана суперечливість може бути вирішена шляхом збільшення ($U_m / U_{п.еф}$) за рахунок фільтрації сигналу від перешкод.

З врахуванням цього можна визначити вірогідність контролю буримості гірських порід за допомогою розробленого методу

$$\beta = 1 - \frac{p_x^*}{p_x} = 1 - \frac{0,008}{0,1} = 0,92,$$

де: p_x^* - ймовірність помилкових рішень при використанні розробленого методу контролю буримості гірських порід;

$p_x = 0,1$ – ймовірність помилкових рішень до застосування контролю буримості гірських порід, що визначена за даними підприємства як рівень значущості $\alpha=0,1$ [115]. Такий результат підтверджує високу вірогідність контролю буримості за допомогою розробленого методу.

Користуючись значеннями ймовірності хибного повідомлення про зміну буримості гірських порід $p_x=\alpha$, можна розв'язати задачу вибору порогового значення буримості для системи контролю, користуючись оцінкою вірогідності [115]:

$$p \left\{ \sup S_k \geq U_{\text{пор}} \right\}, \quad k = \overline{N', n},$$

де $U_{\text{пор}}$ – порогове значення;

N' – кількість замірів;

n – поточний номер значення параметра, який поступив на контроль;

$S_k = \sum_{i=N}^n (\xi_i - \hat{a})$ - сума відхилень значень контрольованого параметра від

середнього значення;

$\hat{a} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \xi_i$ - оцінка математичного сподівання випадкової величини ξ за N'

замірів;

N – інтервал усереднення, що задається;

ξ – контрольована випадкова величина.

Пороговий рівень $U_{\text{пор}}$ можна визначити із нерівності

$$p \left\{ \sup S_k \geq U_{\text{пор}} \right\} \leq \alpha, \quad k = \overline{N', n}$$

або із наближеної нерівності [115]

$$\alpha \geq 2p \left\{ S_n \geq U_{\text{пор}} \right\} 2h \left\{ \frac{S_n}{\sqrt{n-N'}} \geq \frac{U_{\text{пор}}}{\sqrt{n-N'}} \right\} = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\frac{U_{\text{пор}}}{\sqrt{n-N'}}}^{\infty} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx, \quad (3.41)$$

де σ^2 – дисперсія випадкової величини ξ_i , або $\alpha = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U_{пор}}{\sigma\sqrt{n-N'}}}^{\infty} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} dx$.

Як оцінку σ^2 використаємо вибірккову дисперсію

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N' - 1} \sum_{i=1}^{N'} (\xi_i - \hat{a})^2. \quad (3.42)$$

Знаючи α , по таблицях знаходимо $\frac{U_{пор}}{\sigma\sqrt{n-N'}}$, а потім за оцінкою $\hat{\sigma}^2$ - безпосередньо поріг буримості $U_{пор}$. Тут n – номер значення параметру, який перевіряється.

Для визначення моменту переходу долота в породи іншої буримості визначають різницю

$$\Delta = U_{пор}'' - |S_n''|,$$

де $S_n = \sum_{i=N'}^n (\xi_i - \hat{a})$ - сума відхилень нових значень контрольованого параметра від визначеного середнього значення. Якщо $\Delta \geq 0$, то значення параметра не змінилося, а якщо $\Delta < 0$ і $S_n > 0$, тоді збільшилося, якщо $\Delta < 0$ і $S_n < 0$, тоді зменшилося.

Висновки до третього розділу

За результатами проведених теоретичних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведене моделювання механічної швидкості буріння нафтових і газових свердловин роторним способом в умовах Прикарпаття підтвердило можливість використання базової механічної швидкості буріння як оцінки буримості гірських порід для підвищення точності виявлення меж залягання гірських порід різної буримості.
2. Проведене моделювання оцінки інтенсивності відносного спрацювання озброєння шарошkových доліт дало змогу обґрунтувати методику

відокремлення низькочастотної компоненти механічної швидкості буріння, яка зумовлена зміною властивостей гірських порід, від її поточного середнього значення.

3. На базі технічних вимог до автоматизованого контролю буримості гірських порід проведено аналіз похибки контролю, який дозволив встановити зв'язки систематичної і випадкової похибок контролю з показниками буримості гірських порід, призначеним для оптимізації управління процесом буріння.
4. Вибрано частоту опитування датчиків системи автоматизованого контролю буримості, що дозволяє зберігати допустиму похибку у визначені значень сигналів на інтервалах між моментами часу опитування.
5. Проведене моделювання механічної швидкості буріння довело можливість використання штучних нейронних мереж для прогнозування середнього значення механічної швидкості буріння на фоні високочастотних завад з допустимим рівнем помилки.
6. На базі аналізу розподілу контрольованої величини і похибок визначено такі характеристики контролю як ймовірність хибної тривоги, ймовірність невизначеної відмови та вірогідність контролю, що дало змогу обґрунтувати методику визначення порогового значення буримості гірських порід для системи автоматизованого контролю.

РОЗДІЛ 4

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА БЕЗКОНТАКТНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ БУРИМОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

4.1. Розроблення структурної схеми системи автоматизованого контролю буримості гірських порід в умовах перешкод з урахуванням похибки давача

Об'єм контролю визначали евристичним методом, який базується на колективному досвіді фахівців. Контрольованою величиною, яку повинна видавати система контролю, є коефіцієнт буримості K_f , а необхідна сукупність величин, що спостерігаються, така: h , F , n , t_p , d . Перші три величини повинні спостерігатися за допомогою давачів проходки, осьового навантаження на долото і частоти обертання долота. Поряд з аналоговими давачами системи БУР- САК, СКУБ – М2, пропонується використати інтелектуальні давачі відомих фірм Fisher–Rosemount і Siemens, а також пристрої контролю цих параметрів на вибої свердловини [83-87,91,101].

Структура системи автоматизованого контролю буримості в умовах перешкод з урахуванням похибок давача зображена на рис.4.1.

Наявність відомостей про комплекс контрольованих величин і відповідних давачів з їх характеристиками дозволяє перейти до складання алгоритмічної структури системи автоматизованого контролю буримості гірських порід. Вона містить три основні частини: 1 – блок одержання найбільш точних оцінок поточних значень величин, що спостерігаються; 2 – блок формування шуканої контрольованої величини, обчислювальні та інші операції за вже відомими оцінками величини, що спостерігаються, 3 – блок виконання операцій контролю над контрольованими величинами, необхідних для

одержання результатів контролю (індикація, друк, сигналізація і т. п); 4 – база даних (рис.4.2).

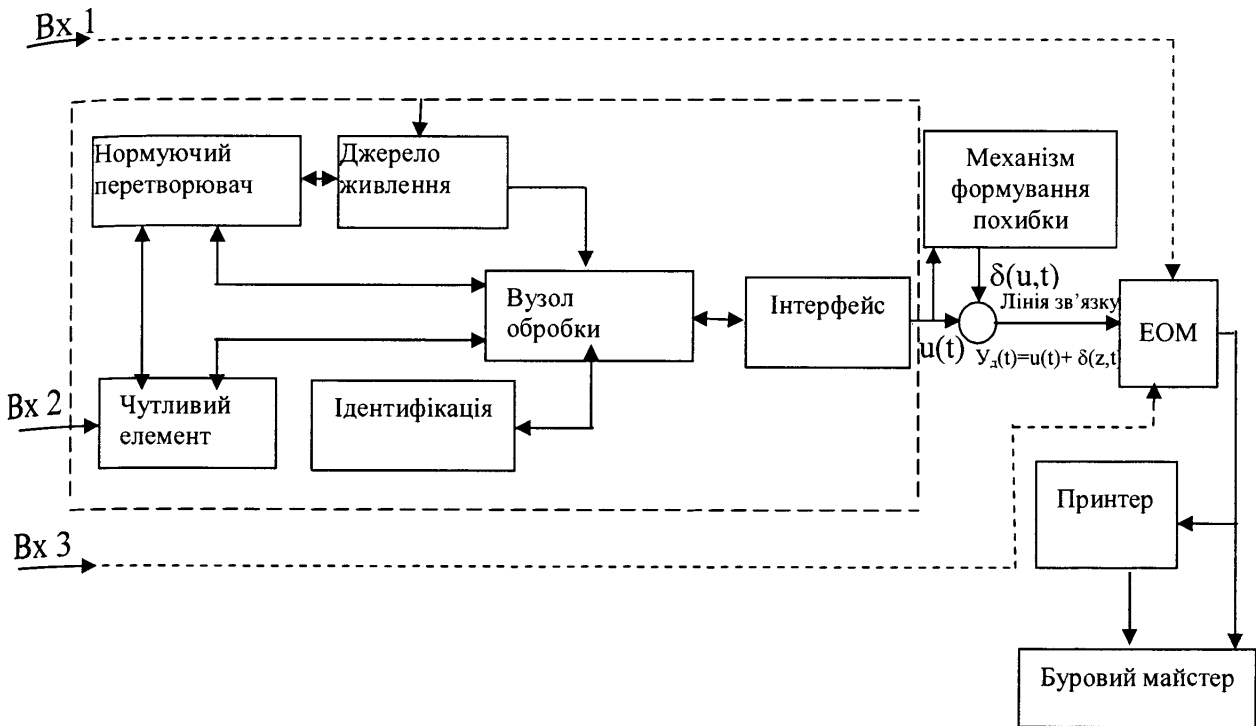


Рис. 4.1. Структура системи автоматизованого контролю буримості в умовах перешкод з урахуванням похибок давача

Характеристики давачів, системи СКУБ – М2, які використані в системі контролю, приведені в табл.4.1.

Отже, структура автоматизованої системи для оцінки буримості гірських порід складається із комплексу первинних вимірювальних перетворювачів, що монтується на технологічному обладнанні бурової установки, інформаційного блоку і робочого місця бурового майстра.

Сигнали від первинних вимірювальних перетворювачів поступають на інформаційний блок, який являє собою низову систему збору і обробки первинної технологічної інформації і виконує такі функції:

- прийом сигналів від первинних перетворювачів;
- представлення інформації на цифрових індикаторах;
- первинну обробку інформації (усереднення, фільтрація);

- аналіз виходу за межі встановлених обмежень контрольованих параметрів;
- передачу інформації через пристрої зв'язку на мікропроцесори комп'ютера.

В середині інформаційного блоку розміщений мікроконтролер, який призначений для первинної обробки інформації, що отримується від первинних вимірювальних перетворювачів, управління роботою індикаторів і всіх складових частин системи.

Таблиця 4.1

Характеристики давачів

Контрольований параметр		Вимірювана фізична величина, яка відповідає контрольованому параметру			Засіб представлення інформації
Найменування одиниць вимірювання	Верхня межа вимірювань	Найменування, одиниця вимірювання	Верхня межа вимірювань	Границя допустимого значення приведеної основної похибки, каналу вимірювання, %	
Частота обертання ротора, г/мін	300	Частота обертання ствола вертлюга або вала привода ротора, г/мін	300		PS, PV
Осьове навантаження на буровий інструмент, кН	400	Зміна зусилля, яке вимірюється при контролі навантаження на гак, кН	Не нормується	Не нормується	PH, PS
Подача бурового інструменту, м	Не обмежена	Кутове переміщення валу, що зв'язаний з барабаном лебідки, градус	360 ^x 172,8	-	PS
Тиск нагнітання бурового розчину, МПа	40	Тиск рідини в лінії нагнітання, МПа	40	± 2,5	PS, PV

Робоче місце бурового майстра розміщується у вагоні інженера – технолога. До його складу входить комп'ютер і відповідне програмне забезпечення. В процесі буріння технологічна інформація від вимірювальних перетворювачів (БУР-САК, СКУБ–М2, Геосервіс [85,97,100,121], Геотест-5) по мережі через перетворювач RS 232/RS 485 вводиться в обчислювальний пристрій. Всі перетворювачі із робочими місцями бурового майстра зв'язані двохрановідною лінією по інтерфейсу RS 232/RS 485.

Крім двох програм, що входять до складу базового варіанту, тобто програми реєстрації технологічних параметрів процесу буріння і друку даних, що працюють в режимі реального часу, розроблена система доповнена програмами визначення показника буримості за технологічними параметрами згідно моделі об'єкта контролю.

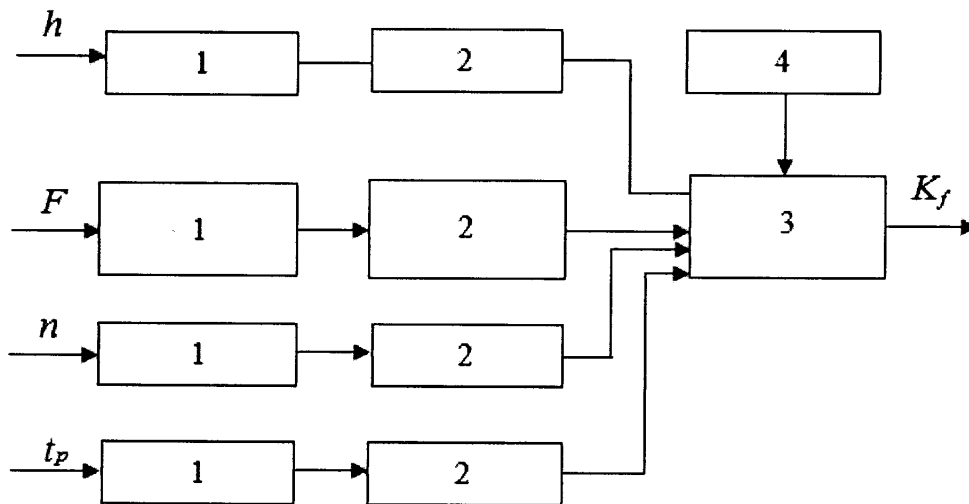


Рис. 4.2. Алгоритмічна структура системи автоматизованого контролю буримості гірських порід

Криві виведенні на блок спостереження, де кожна крива реєструється в реальному часі і прив'язана до глибини свердловини. Фрагмент цих кривих приведений на рис.4.3 для свердловини №1 Булганакська ВАТ «Чернігівнафтогазгеологія».

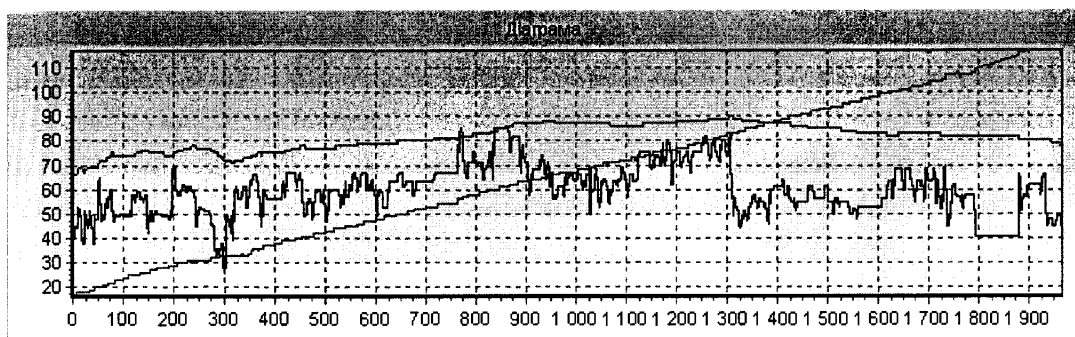


Рис. 4.3. Фрагмент запису кривих коратажу

Програмне забезпечення системи доповнено програмними продуктами, які дають змогу визначати кореляційні залежності між крефіцієнтами буримості, визначеними за різними методами, а також коефіцієнти кореляції між різними методами контролю меж пластів гірських порід. Вся інформація про параметри і показники процесу буріння, буримість гірських порід виводиться на екран комп'ютера. Фрагмент основного екрану програми реєстрації приведений на рис.4.4.

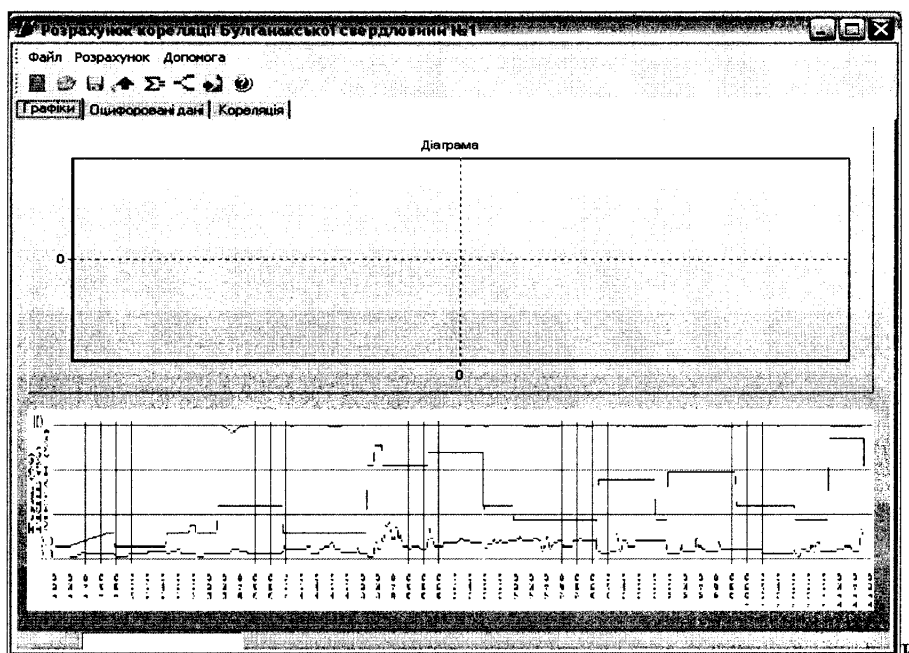


Рис. 4.4. Головне вікно програми виявлення буримості

В розробленому програмному забезпеченні виконується оцифрування діаграм, отриманих за допомогою приведених вище технічних засобів геолого-технологічного контролю процесу буріння і визначаються кореляційні

залежності між кривими, приведеними на діаграмі. Для розрахунку кореляційної залежності між кривими, які приведені на діаграмі необхідно виконати такі дії:

- 1) завантажити програму;
- 2) за допомогою кнопки «Завантаження діаграми» відкрити файл із збереженою діаграмою (рис.4.3);
- 3) натиснути кнопку «Розрахунок». В результаті буде отримано оцифровану діаграму і значення її точок по осях і абсцис і ординат. Вікно програми набуде вигляду – рисунок 4.5. Координати точок можна побачити на закладці «Оцифровані дані»;
- 4) натиснути кнопку «Розрахунок кореляції» і перейти на закладку «Кореляція» (рис.4.6). Результати розрахунків можна експортувати в формат Excel за допомогою кнопки експорту.

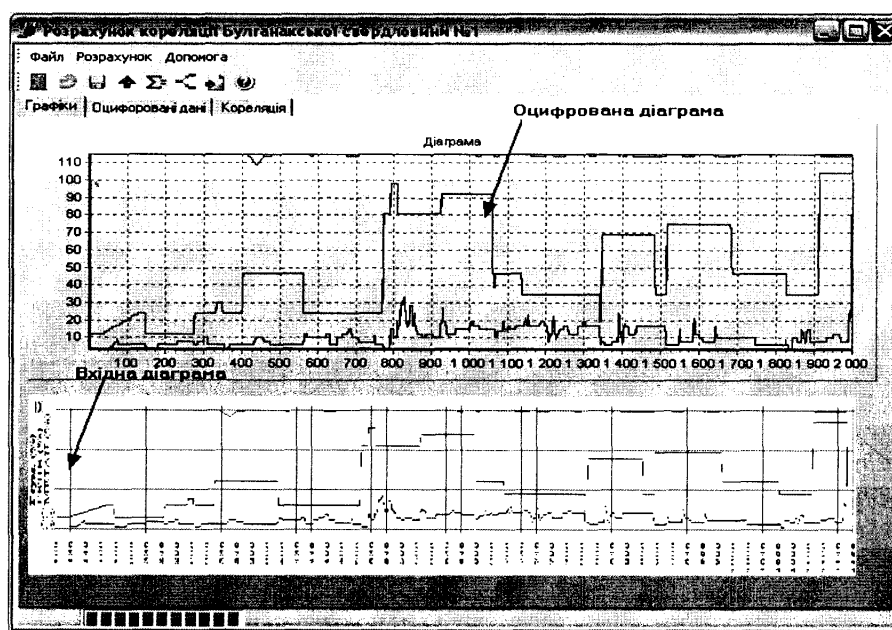
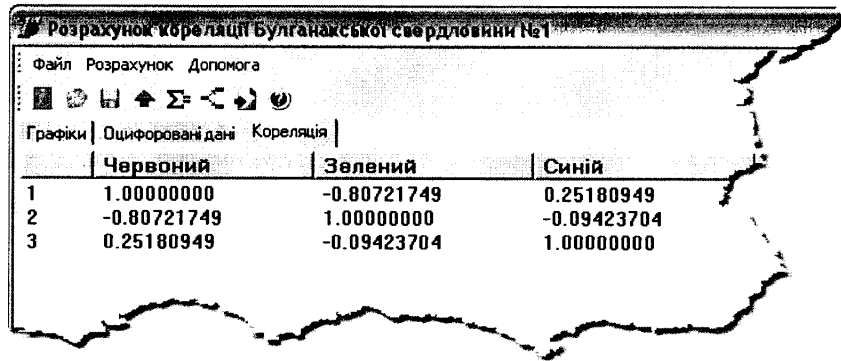


Рис.4.5. Результат оцифрування

Нормальну роботу автоматизованої системи контролю буримості гірських порід забезпечує низьковольтною стабілізованою напругою блок живлення.

Отже, розроблено автоматизовану систему контролю буримості гірських порід, яка основана на сучасних технологічних засобах контролю і управління

процесом буріння. Для розширення її функціональних можливостей система доповнена розробленими алгоритмами і програмами, що дають змогу визначити кореляційні залежності між результатами контролю буримості гірських порід, визначених різними методами, і тим самим підвищити ефективність контролю процесу буріння.



	Червоний	Зелений	Синій
1	1.00000000	-0.80721749	0.25180949
2	-0.80721749	1.00000000	-0.09423704
3	0.25180949	-0.09423704	1.00000000

Рис. 4.6. Розрахунок кореляційних залежностей

Розроблено інструмент для розрахунку показника буримості гірських порід в реальному часі, який містить технічні засоби для вводу вихідних даних, розрахунку буримості, компоненти математичного забезпечення, компоненти програмного забезпечення, базу даних; результати контролю друкуються на пристрої, що дозволяє оцінювати властивості розбурюваних порід в процесі поглиблення свердловин.

4.2. Удосконалення системи контролю і управління процесом буріння «Geobox» для діагностування буримості порід і стану долота

Вимірювальна інформація про параметри і показники процесу буріння і технологічний стан бурового обладнання є основною складовою в процесі створення і використання сучасних автоматизованих систем контролю і керування.

Тому актуальним є питання діагностування [94,98] буримості порід і стану доліт, що використовуються при бурінні свердловин, за рахунок створення і

впровадження автоматизованих систем контролю. Саме технологічний процес є складним нестационарним випадковим процесом, що характеризує взаємодію системи “долото-порода” і великою мірою визначається станом технологічного обладнання.

Сучасна схема реалізації системи контролю і управління процесом буріння [101-103] приведена на рис.4.7. Дамо коротку характеристику даної системи. Система забезпечує оперативний централізований контроль процесу буріння і доставку даних, що реєструються на станціях геолого-технологічних досліджень (ГТД), в центр керування у реальному часі. Центром, через який проходять всі потоки даних в системі, є сервер підключень. Сервером підключень може служити будь-який комп'ютер, постійно підключений до мережі Internet.

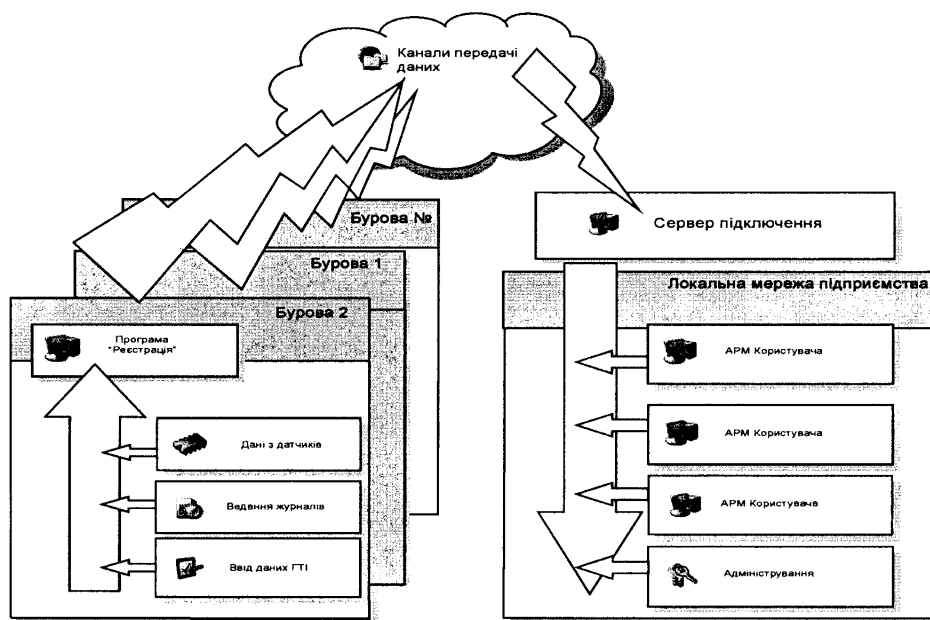


Рис. 4.7. Схема реалізації контролю і управління процесом будівництва свердловини

Із аналізу існуючих систем контролю і управління процесом буріння для визначення фізичного стану долота найкраще підходить інформаційна система “GeoBox”. Дана система випускається серійно і може бути використана на будь-яких бурових [101-103]. Інформаційна система “GeoBox” призначена для

автоматизації збору, обробки, аналізу і зберігання геолого-технологічної інформації в процесі будівництва свердловини.

Ця система включає:

- базовий модуль “Geo Vox”; який забезпечує базовий інтерфейс користувача та інтегрує в себе додаткові модулі;
- програму “Реєстрація”, яка здійснює реєстрацію показників датчиків в процесі буріння;
- агент доставки даних, який здійснює збір і доставку даних з бурових в центр;
- агент відправки даних, який здійснює по запиті агента доставки підготовку і відправку запитаних даних;
- модуль адміністрування блоку даних (БД), що забезпечує інтерфейс конфігурації інформаційної системи “Geo Vox”;
- модуль створення звітних форм, що містить візуального будівника звітних форм;
- програма “Geo Data”, що забезпечує візуальне відображення даних реєстрації;
- SQL – сервер Fire Bird 1.0, що вимагає сервер даних і дозволяє проводити:
- ручне введення інформації (опис шламу, керна, результати вимірів);
- відображення інформації у вигляді таблиць, діаграм і звітів / рапортів;
- аналіз та інтерпретація даних: контроль за аномальними змінами реєстрованих параметрів; підрахунок статистики свердловин; порівняння даних з декількох свердловин за однією площею; збір і підготовка даних для тривимірної моделі родовища; автоматична і ручна інтерпретація даних;
- документувати процес: ведення журналу виданих рекомендацій, використання доліт; ведення, зберігання і відображення інших технологічних даних (характеристик доліт, вибійних двигунів, бурових насосів); документації по свердловині, та видавати завершальні та

оперативні звіти для вирішення як технологічних, так і геологічних завдань; а також

видавати висновки по свердловині.

Функціональна схема ІС “Geo Vox” приведена на рис. 4.7.

Проте, дана система не дозволяє проводити діагностування бурового обладнання, через відсутність технічних засобів, алгоритмів діагностування, які повинні базуватись на відомих критеріях безаварійної роботи обладнання. Для вирішення однієї із задач діагностування бурового обладнання розглянемо алгоритм контролю стану долота як за озброєнням, так і за опорою. Для цього розширимо функціональні можливості ІС “Geo Vox”. В блок бази даних від давачів технологічних параметрів, що змонтовані на буровій, введемо інформацію про поточне значення механічної швидкості буріння V і крутного моменту на долоті $M_{кр}$. В центр обробки даних запишемо програму, що реалізує алгоритм визначення буримості гірських порід, а також критерій оцінки стану долота як за озброєнням, так і за опорою. Для оцінки технічного стану долота використаємо комплексний показник $\alpha = \frac{V}{M_{кр}}$, що характеризує зношування долота по озброєнню і по опорі [104], для оцінки буримості. Аналізуючи дане співвідношення оператор-бурильник приймає рішення про подальший процес буріння, а саме, коли проводити підйом інструменту на поверхню, щоб не допустити аварій. Наприклад, якщо показник α різко спадає, то відбувається швидке зношування озброєння долота, тоді необхідно робити підйом інструменту, бо буріння стає недоцільним. Якщо показник α різко спадає, але механічна швидкість не зменшується, то зростає крутний момент на долоті, що характеризує швидкий знос опор долота. Ця технологічна ситуація може призвести до ускладнень або аварій. В цьому випадку теж необхідно робити підйом бурового інструменту.

Аналізуючи характер зміни базового значення механічної швидкості буріння оператор-бурильник має можливість оцінити буримість гірських порід.

Удосконалена система контролю управління на основі ІС “Geo Vox” для діагностування стану доліт приведена на рис. 4.8.

Таким чином, використавши ІС “Geo Vox” і доповнивши її алгоритмом і програмою для контролю технічного стану долота, реалізували автоматизовану систему контролю і управління процесом буріння, що дає змогу оцінювати буримість гірських порід, а також технічний стан долота як за озброєнням, так і опорою. Використання таких систем на бурових дає змогу зменшити кількість аварійних ситуацій, і тим самим підвищити ефективність бурових робіт.

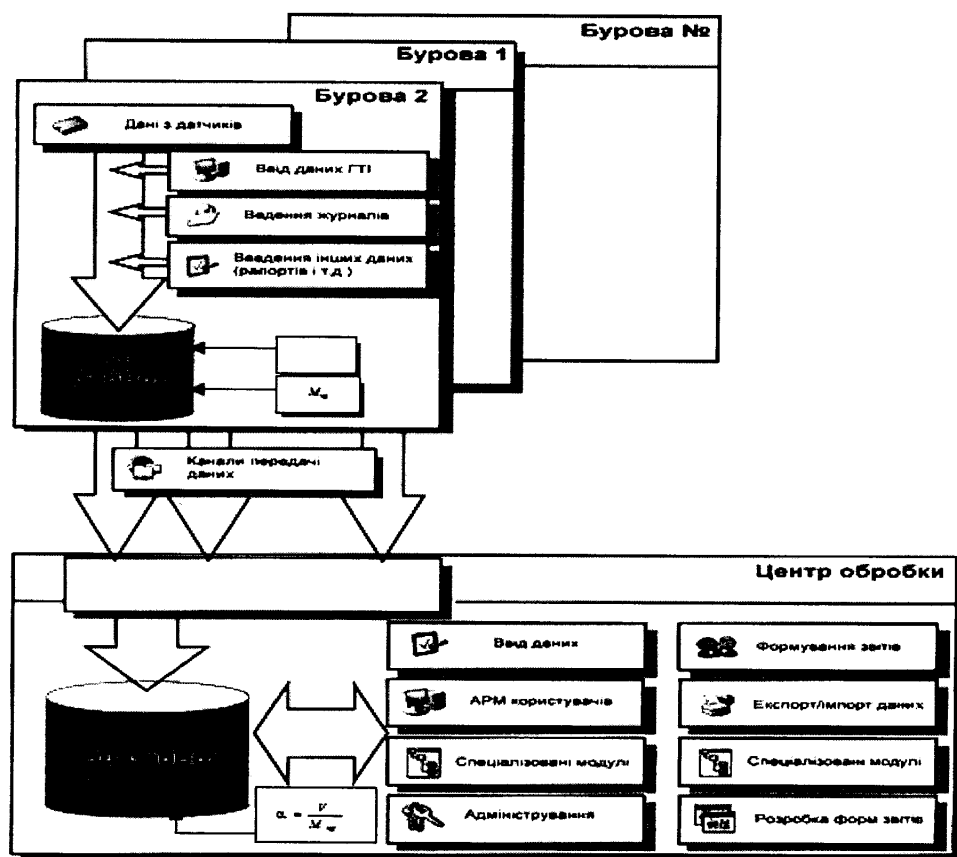


Рис. 4.8. Удосконалена система контролю і управління на основі “Geo Vox” для діагностування стану доліт

4.3. Розроблення структурної схеми системи підтримки прийняття рішень для управління процесом буріння свердловин в умовах невизначеності

Буримість за розробленими моделями визначається автоматично за допомогою мікропроцесорної системи [105,121,124,125,126,127,128,129].

Буріння відповідної свердловини ведеться згідно ГТН. На початку кожного довбання буровий майстер видає завдання бурильнику, в якому визначається типорозмір долота, осьова сила на долото F , частота його обертання n , витрата бурової рідини Q та інші. Як було викладено вище, що в процесі буріння змінюється буримість гірської породи і її кількісні показники визначаються автоматично. Дані про буримість і механічну швидкість буріння v_m , проходку h , осьову силу F , швидкість його обертання n повинні аналізуватись буровим майстром. При застабілізованій осьовій силі на долото, його швидкості обертання, кількості і якості промивної рідини необхідно детально проаналізувати механічну швидкість буріння v_m і проходку на долото h . У випадку зменшення механічної швидкості буріння v_m і проходки h напрошується висновок про те, що даному геологічному розрізу не відповідає даний типорозмір долота. У бурового майстра виникає запитання, як далі бути? Перед ним поставлено завдання прийняти рішення в умовах незвичайності, а процес буріння є саме таким. В даному випадку проблему прийняття рішення щодо вибору відповідного типорозміру долота можна сформулювати наступним чином [113]:

$$\langle Q, \Phi, D, I, F_0 \rangle,$$

де Q – критерій, що характеризує вимоги до відповідності типорозміру долота і гірської породи;

Φ – альтернативні рішення, які можуть бути прийняті (заміна долота чи ні);

D – правила рішень, які можуть бути використані (через який час роботи заміну, на яке долото);

I – необхідність для даної задачі інформації (інформація про буримість гірської породи, параметри і показники процесу буріння);

F_0 – особливість особи, що приймає рішення заміни долота (досвід роботи взагалі в конкретному регіоні).

У відповідності із [114] розузгодження між фактичними параметрами і показниками процесу буріння і тими, що закладені на стадії проектування для відповідного горизонту, згідно з ГТН, створюють технологічну проблему. Цю

проблему можна вирішити на основі теорії прийняття рішень в умовах невизначеності у наступні етапи:

- оцінка буримості гірської породи на основі технологічної інформації про параметри і показники процесу буріння;
- використання алгоритму розв'язку задачі вибору типорозміру доліт відповідно до характеру зміни буримості гірської породи у порівнянні із ГТН;
- розробка дій, які направлені на вибір конкретного типорозміру долота, і параметрів і показників процесу буріння у зв'язку із зміною буримості;
- аналіз процесу буріння за параметрами і показниками процесу буріння згідно прийнятих рішень.

Вибором типорозмірів доліт за зміною буримості гірської породи безпосередньо в реальному часі буріння вирішується багатоцільова задача управління.

Структурна схема системи підтримки прийняття рішень для управління вибором типорозміру доліт процесом буріння свердловин в умовах невизначеності наведена на рис.4.9. Запропонована структурна схема підтримки рішень реалізована на базі вітчизняних технічних засобів контролю і управління процесом буріння БУР-САК і СКУБ-М2, розроблених Івано-Франківським колективним підприємством спеціального конструкторського бюро засобів автоматизації (КП СКБ ЗА) і приведених вище алгоритмів по визначенню буримості гірських порід. Дана система працює наступним чином. На основі технологічних параметрів інформація поступає у мікропроцесор, де в основі алгоритмів обчислюються поточні значення коефіцієнтів буримості гірської породи.

У мікропроцесор вводяться прогнозовані значення проходки, механічної швидкості буріння, осьової сила на долото, його швидкості обертання (ГТН) і порівнюються із поточними значеннями цих параметрів. В мікропроцесорі ці значення аналізуються зі значеннями коефіцієнтів буримості, що потступають до бурового майстра, котрий зважаючи на свій досвід роботи аналізує їх і приймає

відповідне рішення щодо заміни типорозміру долота, щоб з найменшою похибкою зробити цю заміну. При прийнятті рішень є певний суб'єктивний фактор.

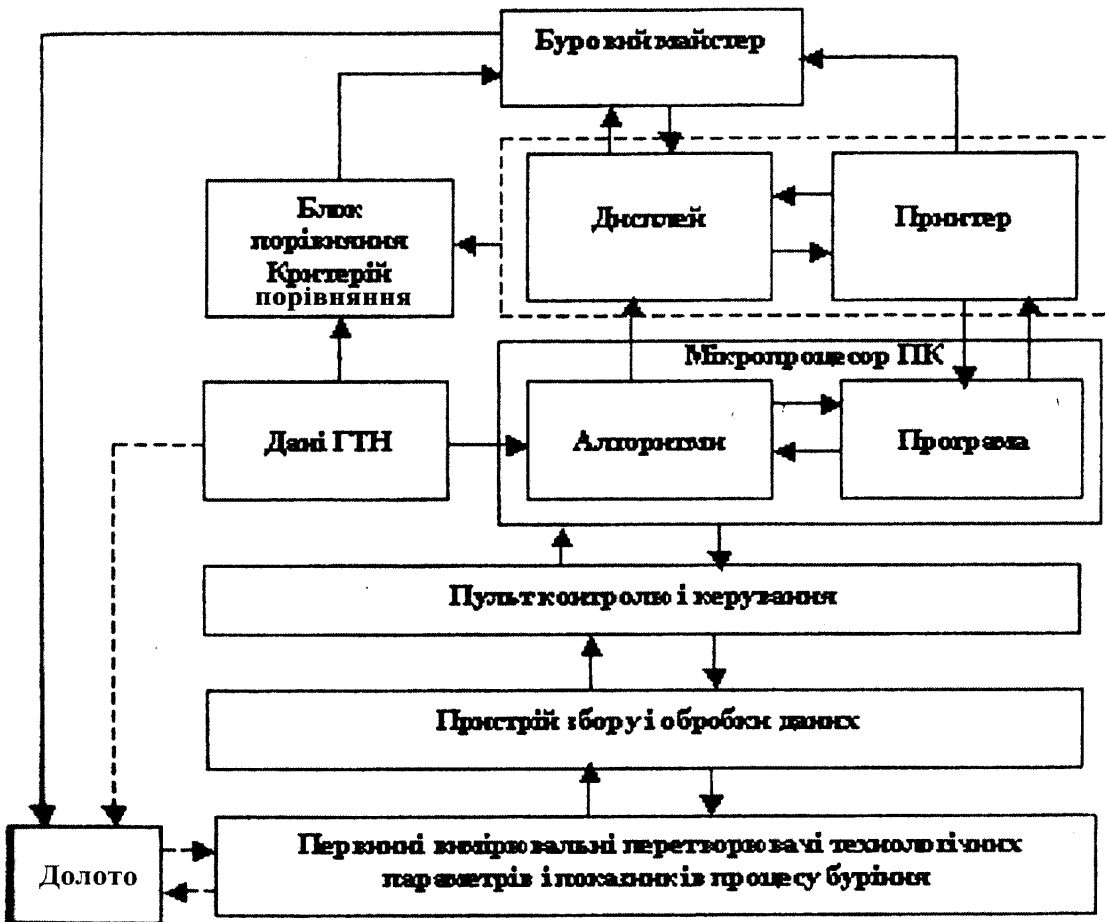


Рис. 4.9. Структурна схема системи підтримки прийняття рішень для управління процесом буріння в умовах невизначеності

Певним чином, проаналізовано процес буріння свердловин на нафту і газ та зроблено висновок про те, що даний процес володіє невизначеністю і щоб прийняти правильне рішення необхідна автоматизована система підтримки прийняття рішень. В результаті цього на основі розроблених алгоритмів визначення буримості гірських порід в процесі буріння із врахуванням даних ГТН розроблена структурна схема системи підтримки прийняття рішень для управління процесом буріння в умовах невизначеності шляхом раціонального підбору типорозмірів доліт.

4.4. Архітектура системи кластерного аналізу буримості гірських порід на базі автоматизованого безконтактного контролю в реальному часі

Оцінка діагностичної цінності (інформативності) різних ознак буримості гірських порід і їх кластеризація є актуальною науково-практичною задачею у зв'язку з інтенсивним впровадженням в галузі цифрових керуючих обчислювальних комплексів [1]. Проте, аналіз літературних джерел (наприклад [92,93,94,111,112,131] та ін.) показує недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку використання формальних критеріїв оцінки і кластеризації буримості гірських порід в реальному часі. Тому метою даного підрозділу є аналіз методів розв'язання задач кластеризації і розробка схеми кластерного аналізу буримості гірських порід на базі даних безконтактного контролю [132,133].

Першим кроком при розробці системи безконтактного контролю буримості гірських порід є вибір діагностичних параметрів і визначення способу її вимірювання. При цьому обмежимося мінімальною їх кількістю – оцінкою швидкості відношення зношення озброєння долота K_6 , яка має високу роздільну здатність. Як показник інформативності (діагностичні цінності) різних ознак буримості, які розглядалися, використано ймовірність правильного розпізнавання буримості. Була досліджена інформативність різних ознак в сенсі вибраного критерію – максимальної ймовірності p_{\max} правильного розпізнавання, яка реалізується розробленою системою розпізнавання на підмножині L_n із заданої множини ознак $L(L_n \in L)$.

Оцінювання діагностичної цінності ознак здійснювалося за допомогою комп'ютерного моделювання та тестовому контрольованому об'єкті, для якого були відомі аналітичні вирази для різних типів буримості гірських порід. Отримані навчаюча й екземаційна виборки об'єкту контролю для певних класів буримості, які недоступні для прямих вимірювань. Аналіз інформативності базується на визначенні показника p_{\max} для різних ознак. Ефективність вибраного показника оцінювалася за результатами розв'язання задачі класифікації

контрольованого об'єкта із екземплярної виборки за допомогою вирішальних правил, побудованих одним із алгоритмів навчання.

Для дослідження діагностичної цінності ознак скористалися методикою, викладеною у [94], згідно якої визначаються три вирішальні функції $b_1(x)$, $b_2(x)$, $b_3(x)$. Функція $b_1(x)$ відокремлює об'єкт контролю 1-го класу від 2-го, 3-го і 4-го; $b_2(x)$ - відокремлює об'єкт контролю 2-го класу від 3-го і 4-го; $b_3(x)$ - відокремлює об'єкт контролю 3-го класу від 4-го. Крім того, для кожного вирішального правила обчислюється ймовірність правильного розпізнавання, на основі яких визначалася усереднена оцінка максимальної ймовірності.

Інформація від системи контролю найбільш інформативного показника буримості гірських порід використовується для розв'язання задачі кластеризації в умовах класів, що перетинаються. Задача кластеризації займає центральне місце у загальній проблемі інтелектуального аналізу даних і є узагальненням цілого ряду технічних задач, в тому числі задач контролю й управління процесом буріння, де виникає необхідність обробки даних за умов відсутності чітких апріорних знань про їх природу. Найбільш ефективними в рішенні задач чіткої кластеризації показали себе штучні нейронні мережі (карти Кохонена, ART-мережі, BSB-нейромоделі [94,95]), які є одними з найбільш розвинутих систем обчислювального інтелекту (рис.4.10).

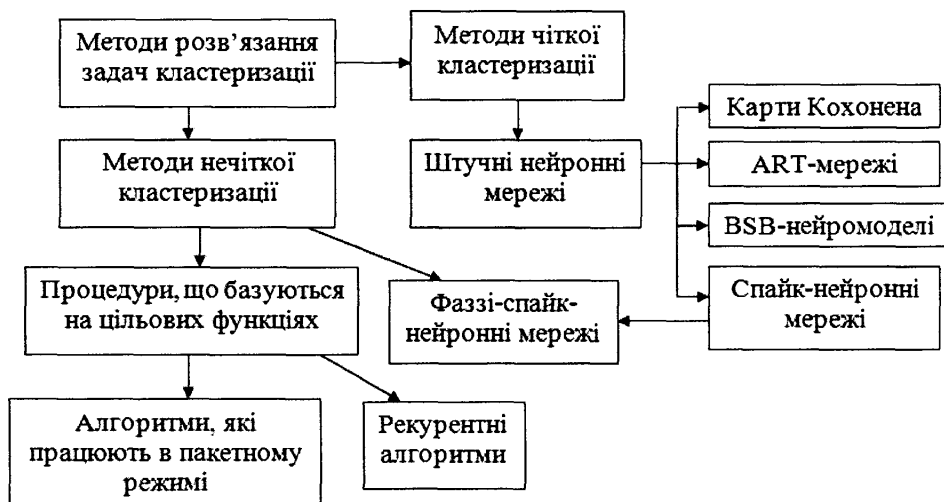


Рис. 4.10. Класифікація методів розв'язання задач чіткої і нечіткої кластеризації

В той же час обробка даних часто ускладнюється ситуаціями, коли класи, що підлягають розділенню, перетинаються між собою, як це спостерігається при класифікації гірських порід за буримістю. В такому випадку найбільш ефективні рішення дозволяють отримати методи кластерного аналізу, що побудовані на засадах нечіткої логіки [95]. Ці методи розвиваються в декількох напрямках, серед яких найбільш точними з математичної точки зору є процедури, побудовані на цільових функціях (рис.4.10). Їх можна розбити на два підкласи: алгоритми, що працюють у пакетному режимі, коли вся вибірка, що обробляється, задана заздалегідь і рекурентні алгоритми, які призначені для обробки образів $x(k)$, що наступають в реальному часі. Саме останній варіант є доцільним для кластеризації гірських порід за буримістю. Розроблену схему кластерного аналізу буримості гірських порід в реальному часі на базі системи безконтактного контролю наведено на рис.4.11.

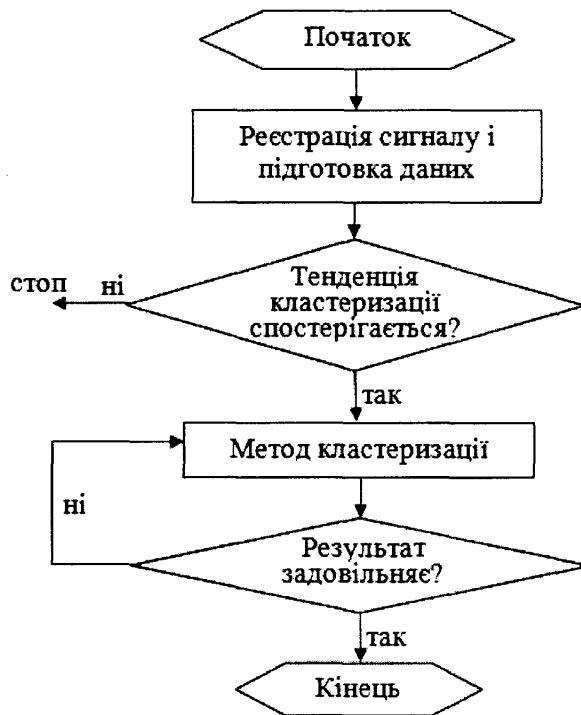


Рис. 4.11. Схема кластерного аналізу

Отже, запропоновано архітектуру системи кластерного аналізу буримості гірських порід в реальному часі, яка базується на пристрої безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід, нечіткому методі

кластеризації і забезпечує високу швидкодію та якість обробки поточної інформації за умов, коли класи буримості гірських порід, що підлягають відокремленню, перетинаються між собою.

Висновки до четвертого розділу

Подані у даному розділі результати можна об'єднати у такі основні висновки:

1. Проведено експериментальні дослідження щодо перевірки удосконаленого безконтактного методу автоматизованого контролю буримості. Результати досліджень підтвердили адекватність математичної моделі механічної швидкості буріння та правильність вибору методу нейромережевого оброблення вимірювальної інформації, як такого, що володіє кращою чутливістю та меншою похибкою вимірювань у порівнянні з традиційними методами контролю.
2. Шляхом експериментальних досліджень встановлено, що межі використання запропонованого методу безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід охоплюють всі гірські породи від м'яких до твердих.
3. Розроблено та подано алгоритм роботи програмного забезпечення для оброблення вимірювальної інформації про буримість гірських порід.
4. Запропонована структура комп'ютерних систем безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід, яка забезпечує розв'язок задачі визначення меж пластів, однорідних за буримістю і яка інтегрована в існуючу систему керування процесом буріння СКУБ-М2.
5. Ефективність і збіжність розробленого алгоритму визначення буримості гірських порід підтверджена імітаційним моделюванням та результатами промислових досліджень, проведених на бурових Прикарпаття, що підтвердило можливість застосування його в системі оптимального керування процесом буріння нафтових і газових свердловин роторним способом.

6. Розроблено прикладний програмний продукт підтримки оптимізаційної задачі а АСКТП буріння, який забезпечує інтегрування розв'язку задачі виявлення однорідних за буримістю інтервалів буріння в існуюче програмне забезпечення.
7. Система автоматизованого контролю буримості гірських порід та програмне забезпечення були опробовані на результатах експериментальних досліджень, які проводили на свердловині №86 Прикарпатського УБР.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі, що полягає у вдосконаленні системи оперативного оцінювання буримості гірських порід, призначеної для оптимізації управління процесом буріння нафтових і газових свердловин з урахуванням підвищення точності виявлення меж залягання гірських порід різної буримості і збільшення ресурсу бурових доліт.

Результати дисертаційного дослідження дозволили зробити наступні висновки, які допоможуть більш ефективно, на базі системи оптимального керування технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин, оцінювати буримість гірських порід.

1. На підставі результатів аналізу сучасних методів і систем контролю буримості гірських порід встановлено, що відсутність теоретично-методичних засад автоматизованих систем оцінювання буримості гірських порід призводить до виникнення проблем в оцінюванні ефективності оптимального керування процесом буріння через нестачу інформації, яка відображає міцність порід в реальному часі. Для їх розв'язання необхідним є розроблення методу ефективного оцінювання буримості гірських порід в умовах невизначеності процесу буріння шляхом використання сучасних безконтактних методів оцінювання буримості гірських порід, які адаптовані до сучасних умов експлуатації вітчизняних бурових установок.

2. На основі результатів досліджень взаємозв'язків основних факторів, що визначають буримість гірської породи, обґрунтовано найбільш інформативний параметр для оцінювання буримості породи в реальному часі, розроблено узагальнену математичну модель буримості в просторі станів, а також динамічну інформаційну модель і метод

визначення базових значень показника буримості, який полягає у тому, що для автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід обирається та механічна швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним або незатупленим шарошковим долотом при бурінні з оптимальними параметрами режиму, що дає змогу визначати зв'язки показників буримості з глибиною свердловини, які є базою для поточної оптимізації та вибору оптимальних режимів під час проектування режимів буріння інших свердловин, що буряться в аналогічних умовах.

3. На базі аналізу розподілу контрольованої величини – показника буримості і похибок вимірювання визначено такі характеристики контролю, як ймовірність хибної тривоги, ймовірність невизначеної відмови та вірогідність контролю, що дало змогу обґрунтувати методику визначення порогового значення буримості гірських порід для системи автоматизованого контролю; як ознака зміни буримості гірських порід використана поява спостереження з рівнем шуму, що перевищує заданий поріг. Для виявлення меж пластів використано рекурентний алгоритм кумулятивних сум.

4. На базі технічних вимог до системи автоматизованого контролю буримості гірських порід проведено аналіз похибок контролю, який дозволив встановити зв'язки систематичної і випадкової похибок контролю з показником буримості гірських порід, призначеним для оптимізації управління процесом буріння нафтових і газових свердловин.

5. На базі аналізу автокореляційних функцій середньої механічної швидкості буріння вирішено задачу вибору оптимальної частоти дискретного контролю відхилень показників буримості гірських порід за межі порогового значення, яка забезпечує визначення меж залягання

гірських порід різної буримості згідно заданого критерію вірогідності контролю.

6. Розроблені в дисертаційній роботі методи ідентифікації буримості гірських порід опробовані на результатах експериментальних досліджень, які проведені на свердловинах №833, №837, №86 Прикарпатського УБР. Програмне забезпечення інтегроване в існуючу систему керування процесом буріння СКУБ-М2.

Отримані результати прийняті до впровадження Прикарпатським УБР, СКБЗА м. Івано-Франківська, а також застосовуються у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що підтверджено відповідними актами впровадження.

ДОДАТКИ

Додаток А

Вихідні дані для геометричної інтерпретації коефіцієнта збудливості K_{16}

Умови проведення експерименту .

Свердловина «Долина-833», інтервал буріння 1450 – 1465 м, долото Ш295,3 СЗ – ГВ Д73, осьова сила на долото $F = 100kH$, швидкість обертання $n = 230об/хв$, витрата бурного розчину $Q = 28,2л/с$, міцність – 100%.

Таблиця А.1

Результати експерименту: $V_0=0,9$

№ з/п	t, год	V_t	ε	ε_y
1	0,6	0,9	1	1,111111
2	1,1	0,82	1,097561	11,219512
3	1,8	0,68	1,323529	1,470589
4	2,6	0,68	1,323529	1,470588
5	3,6	0,53	1,698113	1,886792
6	5,1	0,45	2	2,222222
7	6,4	0,37	2,432432	2,702703
8	7,7	0,34	2,647059	2,941176
9	8,8	0,29	3,103448	3,448276
10	10	0,26	3,461538	3,846154
11	10,1	0,26	3,461538	13,846154
12	11	0,24	3,75	4,16667

Перевірте на відповідність V_t нормальному закону розподілу за критерієм згоди Колмогорова-Смірнова.

Дані вибіркового дослідження розташовані в порядку зростання ознаки.

$$x_1, x_2, \dots, x_n;$$

$$x_i < x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

де n - об'єм вибірки.

Будуємо емпіричну функцію розподілу таким чином:

$$F_x = \begin{cases} 0; & x < x_1; \\ \frac{i}{n}, & x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \\ 1, & x \geq x_n \end{cases}$$

Формулюємо гіпотези:

H_0 : $G(x) = F(x)$ - ознака X описується функцією розподілу $F(x)$.

($F(x) = \Phi(x)$ - функція нормального закону розподілу з параметрами μ (оцінене як середнє арифметичне) і σ (оцінка середнього квадратичного відхилення S));

H_1 : $G(x) \neq F(x)$ - ознака X має іншу функцію розподілу;

α - рівень значущості.

Критерієм перевірки є величина d :

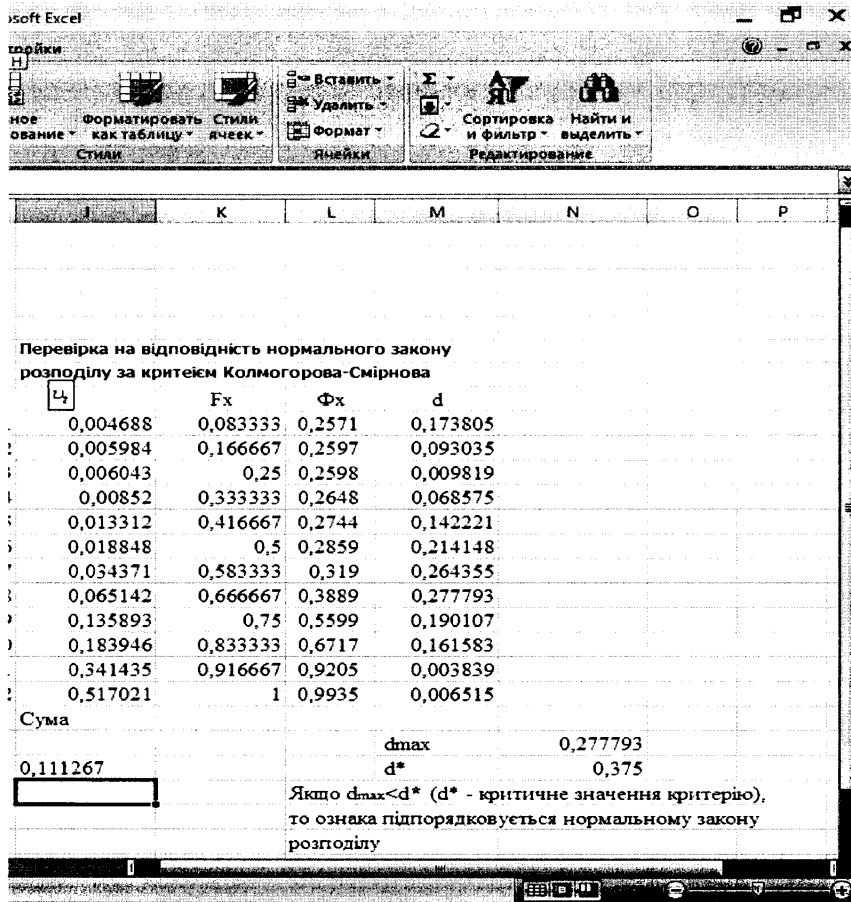
$$d = \max |F_x - F(x)|$$

Величина d є модулем найбільшої різниці між емпіричною та теоретичною функціями розподілу для всіх значень ознаки X .

Величину d називають критерієм згоди Колмогорова - Смірнова.

Якщо $d < d^*$ (d^* - критичне значення критерію), то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу.

Критичне значення критерію $d = d^*(\alpha; n)$ знаходять за таблицею.



Перевірка на відповідність нормального закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова

F_n	F_x	Φ_x	d
0,004688	0,083333	0,2571	0,173805
0,005984	0,166667	0,2597	0,093035
0,006043	0,25	0,2598	0,009819
0,00852	0,333333	0,2648	0,068575
0,013312	0,416667	0,2744	0,142221
0,018848	0,5	0,2859	0,214148
0,034371	0,583333	0,319	0,264355
0,065142	0,666667	0,3889	0,277793
0,135893	0,75	0,5599	0,190107
0,183946	0,833333	0,6717	0,161583
0,341435	0,916667	0,9205	0,003839
0,517021	1	0,9935	0,006515
Сума		d_{max}	0,277793
0,111267		d^*	0,375

Якщо $d_{max} < d^*$ (d^* - критичне значення критерію), то ознака підпорядковується нормальному закону розподілу

Рис. А.1. Перевірка на вірогідність нормального закону

Будуємо графік $v_i = f(t)$.

Точковою оцінкою математичного сподівання є середнє арифметичне даних вибірки або вибіркоче середнє. Його позначають \bar{x} і обчислюють за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

точковою оцінкою генеральної дисперсії за даними вибірки є величина:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{n}{n-1} \sigma_B^2.$$

Найліпшою точковою оцінкою генерального середнього квадратичного відхилення σ є статистика:

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Дані величини для параметра v_i обчислюємо у комірці J23, H24, H25.

	C	D	E	F	G	H	I	J
6								Перевірка на від
7								розподілу за кр
8			№ з/п	t, год	v_i		№ з/п	v_i
9			1	0,6	0,517021277		1	0,004688
10			2	1,1	0,341435342		2	0,005984
11			3	1,8	0,183946252		3	0,006043
12			4	2,6	0,135893417		4	0,00852
13			5	3,6	0,065142106		5	0,013312
14			6	5,1	0,03437058		6	0,018848
15			7	6,4	0,018848384		7	0,034371
16			8	7,7	0,013311838		8	0,065142
17			9	8,8	0,008519715		9	0,135893
18			10	10	0,006043148		10	0,183946
19			11	10,1	0,005983713		11	0,341435
20			12	11	0,004688178		12	0,517021
21			Сума				Сума	
22			Параметри розподілу					
23			а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє)				0,111267	
24			б) Оцінка генер. дисперсії S^2			0,026705		
25			в) середнє квадратичне відхилення			0,163416		
26								
27								

Рис. А.2. Динаміка побудови графіка залежності $v_i = f(t)$

Критерій згоди Колмогорова-Смірнова використовується для дослідження ідентичності двох законів розподілу.

Нехай дані вибіркового дослідження розташовані в порядку зростання ознаки:

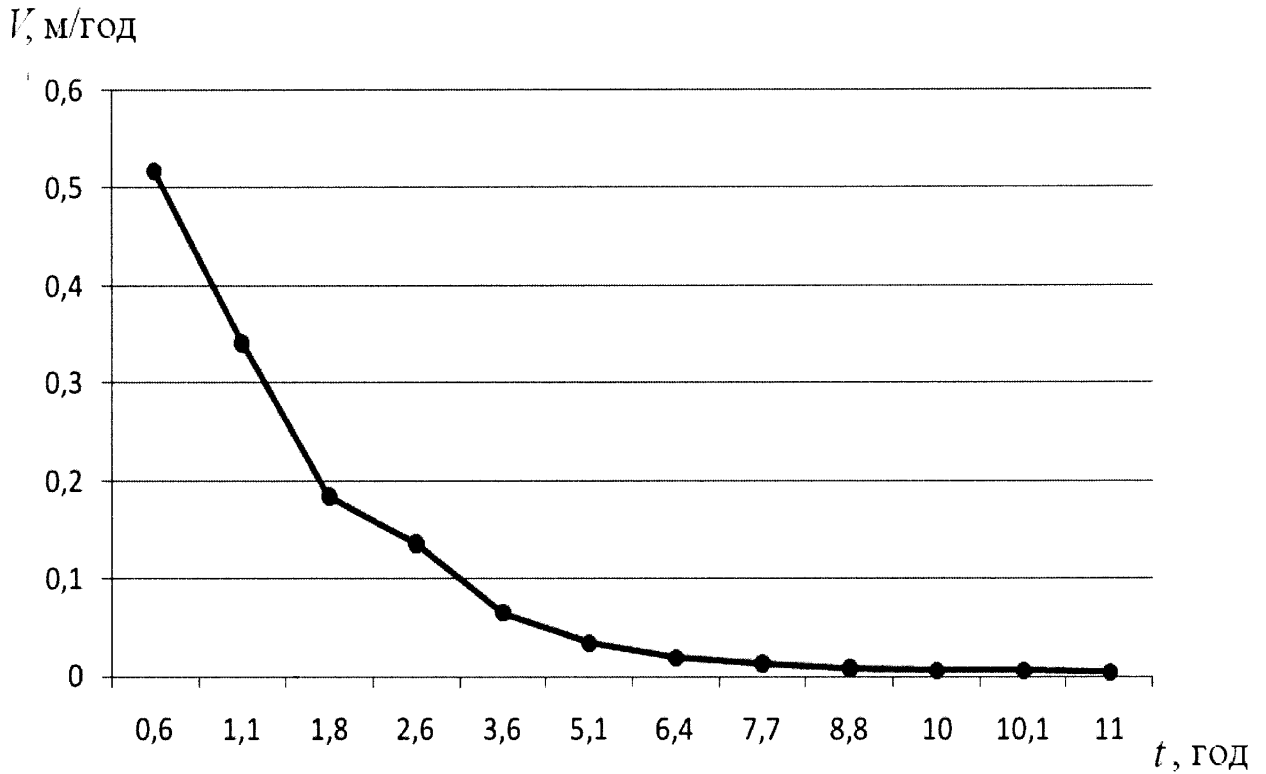
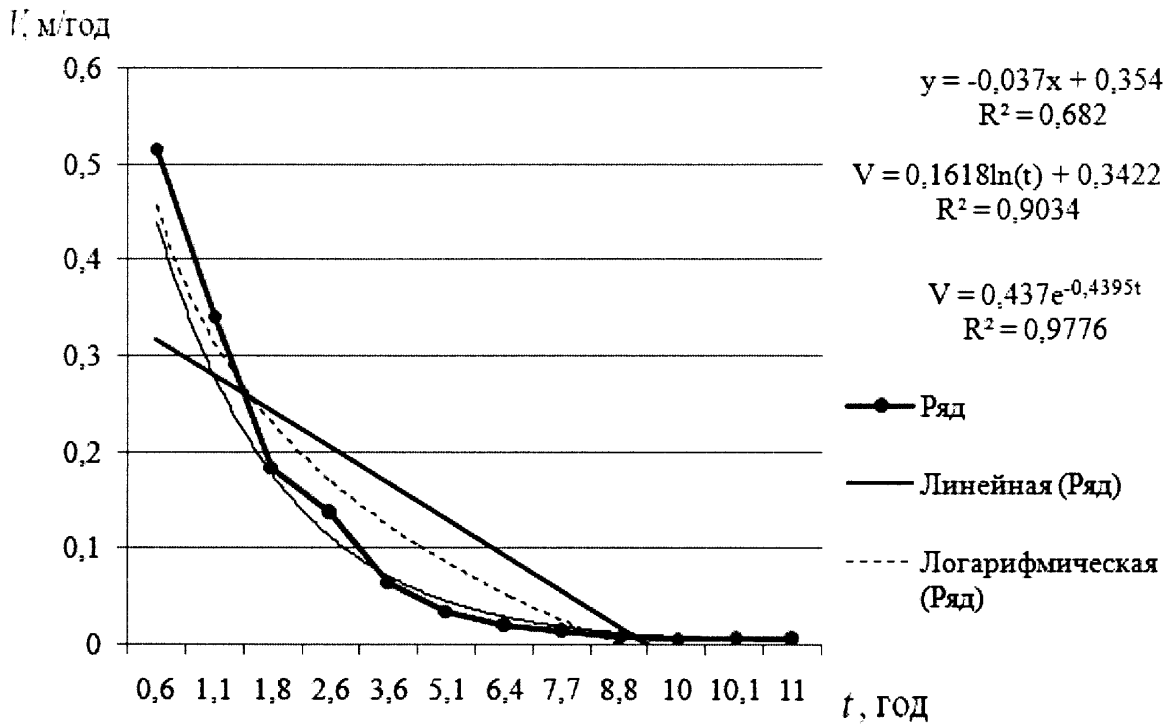


Рис. А.3. Графік залежності $v_1 = f(t)$

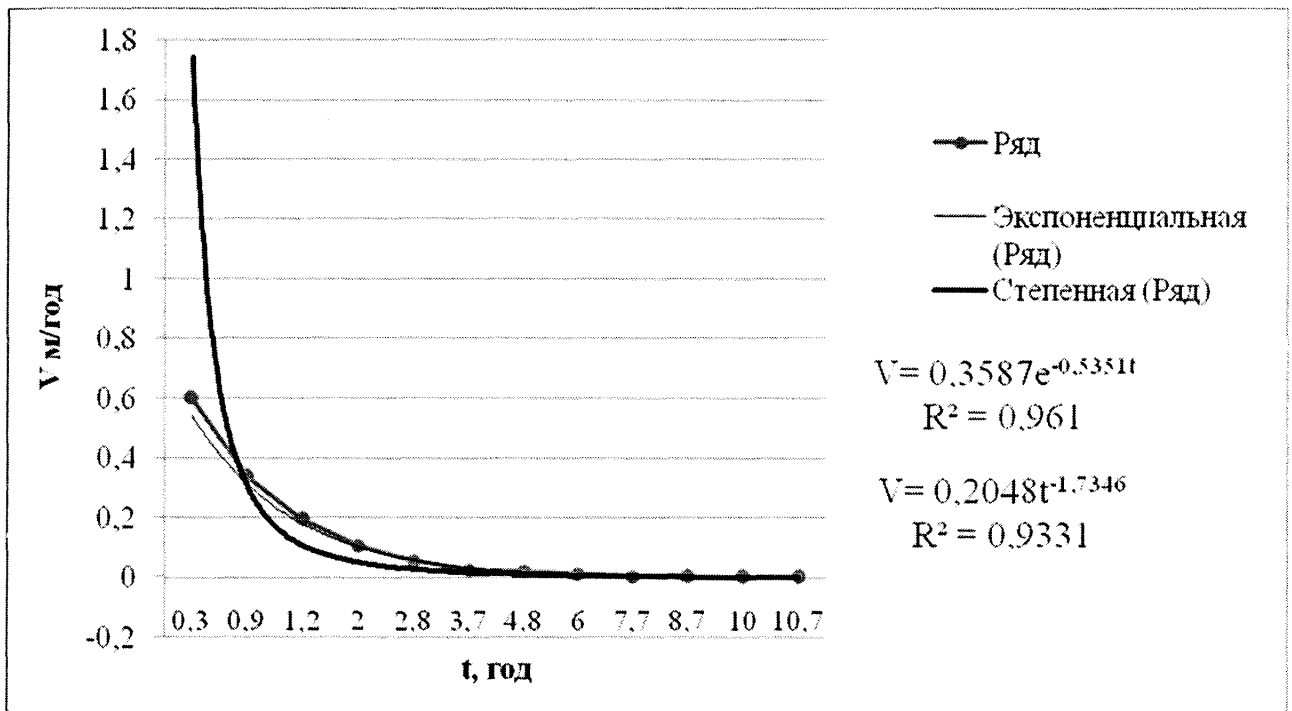
Продовження додатку А

Рис. А.4. Долото Ш295,3 СЗ-ГВ Д73, осьова сила на долото – $F = 100$ кН

Додаток Б

Граничні зміни механічної швидкості проходки в часі при бурінні з постійною осьовою силою на долото

			Перевірка на відповідність нормального закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова				
№ з/п	t, год	U_i	№ з/п	U_i	Φx	d	
1	0,3	0,600611247	1	0,001784	0,083333	0,2703	0,186929
2	0,9	0,337574519	2	0,002745	0,166667	0,272	0,105327
3	1,2	0,196153846	3	0,003154	0,25	0,2727	0,022731
4	2	0,108160237	4	0,004393	0,333333	0,275	0,058361
5	2,8	0,057327227	5	0,012562	0,416667	0,29	0,126689
6	3,7	0,027240026	6	0,021153	0,5	0,3062	0,193839
7	4,8	0,021152869	7	0,02724	0,583333	0,3179	0,26547
8	6	0,012561576	8	0,057327	0,666667	0,3782	0,288454
9	7,7	0,004392765	9	0,10816	0,75	0,4865	0,263535
10	8,7	0,003153772	10	0,196154	0,833333	0,6716	0,161764
11	10	0,002745106	11	0,337575	0,916667	0,8874	0,029274
12	10,7	0,001783633	12	0,600611	1	0,9959	0,004118
Сума			Сума				
Параметри розподілу						d _{max}	0,288454
а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє)			0,114405			d*	0,375
б) Оцінка генер. дисперсії S ² _x			0,033862			Якщо d _{max} < d* (d* - критичне значення критерію), то ознака підпорядковується нормальному закону розподілу	
в) середнє квадратичне відхилення			0,184015				



а) Долото III 295,3 С-ГВ, осьова сила на долото 160кН

Продовження додатку Б

Перевірка на відповідність нормального закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова

№ з/п	t, год	U_i
1	0,6	0,517021277
2	1,1	0,341435342
3	1,8	0,183946252
4	2,6	0,135893417
5	3,6	0,065142106
6	5,1	0,03437058
7	6,4	0,018848384
8	7,7	0,013311838
9	8,8	0,008519715
10	10	0,006043148
11	10,1	0,005983713
12	11	0,004688178

№ з/п	U_i	Fх	Фх	d
1	0,004688	0,083333	0,2571	0,173805
2	0,005984	0,166667	0,2597	0,093035
3	0,006043	0,25	0,2598	0,009819
4	0,00852	0,333333	0,2648	0,068576
5	0,013312	0,416667	0,2744	0,142221
6	0,018848	0,5	0,2859	0,214148
7	0,034371	0,583333	0,319	0,264355
8	0,065142	0,666667	0,3889	0,277793
9	0,135893	0,75	0,5599	0,190107
10	0,183946	0,833333	0,6717	0,161583
11	0,341435	0,916667	0,9205	0,003839
12	0,517021	1	0,9935	0,006515

Сума

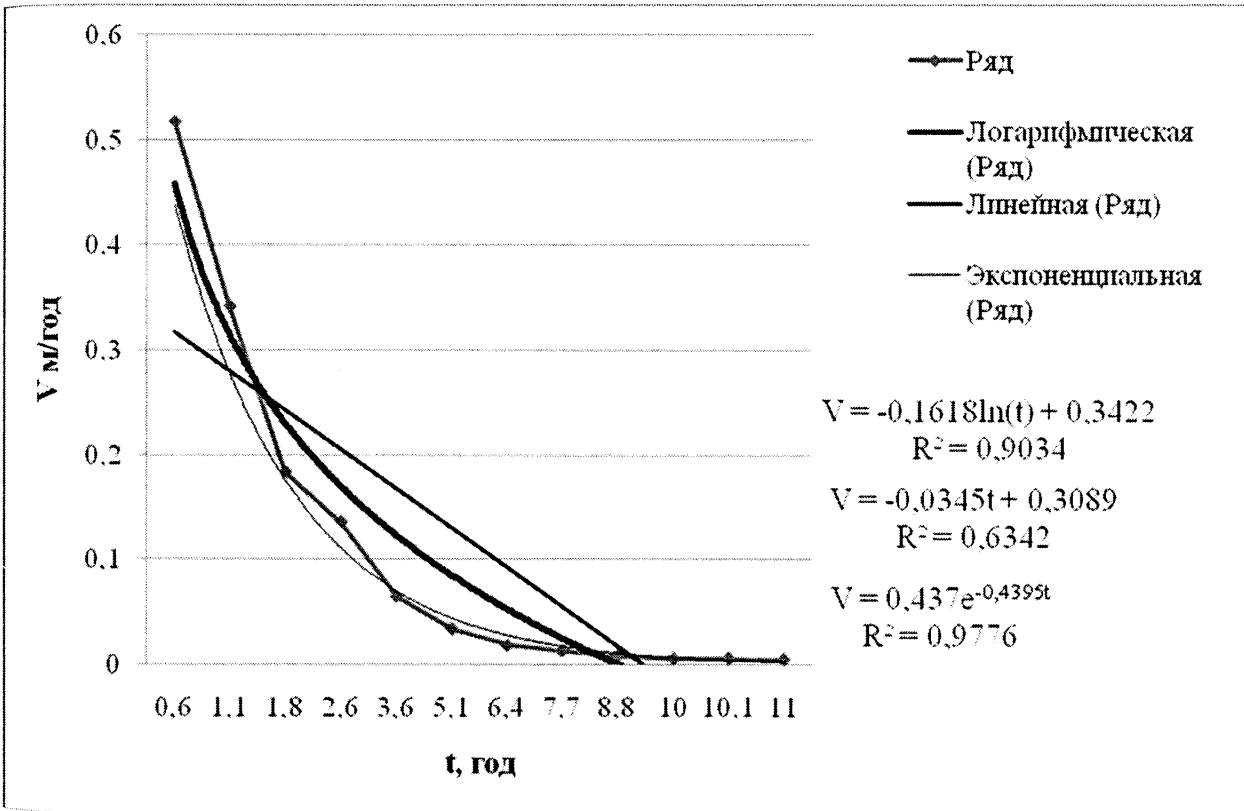
Сума

Параметри розподілу

- а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє) 0,111267
- б) Оцінка генер. дисперсії S^2_x 0,026705
- в) середнє квадратичне відхилення 0,163416

d_{max} 0,27779
 d^* 0,375

Якщо $d_{max} < d^*$ (d^* - критичне значення критерію), то ознака підпорядковується нормальному закону розподілу



б) Долото III 295,3 М-ГВ, осьова сила на долото 160кН

Продовження додатку Б

Перевірка на відповідність нормального закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова

№ з/п	t, год	v_i	№ з/п	v_i	Fх	Фх	d
1	0	1	1	0,019848	0,083333	0,2355	0,152161
2	1	0,46910172	2	0,025907	0,166667	0,242	0,075353
3	1,2	0,424073719	3	0,028571	0,25	0,2449	0,005079
4	2	0,256201421	4	0,045802	0,333333	0,2641	0,069212
5	2,8	0,178500176	5	0,052478	0,416667	0,2718	0,144905
6	3,8	0,138009255	6	0,089253	0,5	0,3157	0,184283
7	5	0,089253188	7	0,138009	0,583333	0,3782	0,205167
8	6,5	0,052478134	8	0,1785	0,666667	0,4327	0,234007
9	7,5	0,045801527	9	0,256201	0,75	0,54	0,210021
10	8,5	0,028571429	10	0,424074	0,833333	0,7529	0,080421
11	9,4	0,025906736	11	0,469102	0,916667	0,7996	0,117081
12	10	0,019848076	12	1	1	0,9964	0,003628
Сума			Сума				

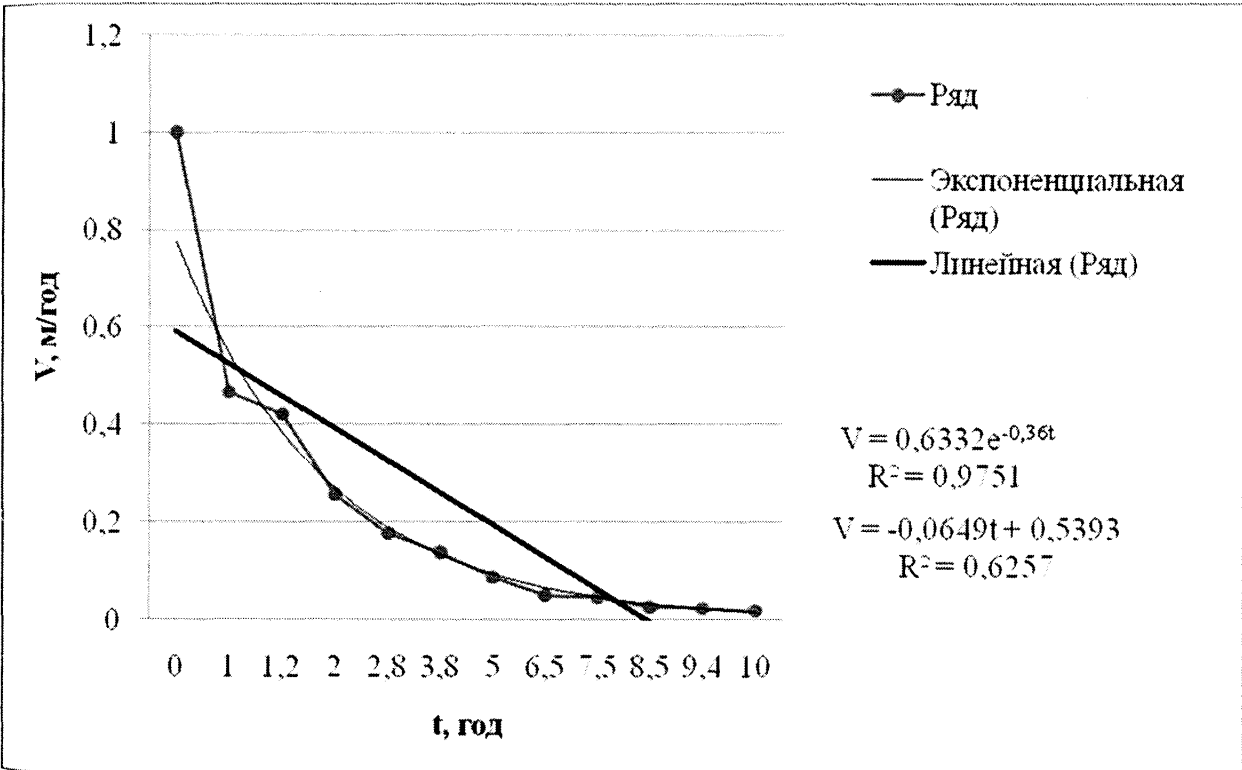
Сума

Параметри розподілу

- а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє) 0,227312
- б) Оцінка генер. дисперсії S^2_x 0,082827
- в) середнє квадратичне відхилення 0,287796

d_{max} 0,234007
 d^* 0,375

Якщо $d_{max} < d^*$ (d^* - критичне значення критерію), то ознака підпорядковується нормальному закону розподілу



в) Долото III 295,3 СЗ-ГАУ (R-16), осьова сила на долото 180кН

Продовження додатку Б

Перевірка на відповідність нормального закону розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова

№ з/п	t, год	U_i	№ з/п	U_i	Fх	Фх	d
1	0,2	8,96007984	1	6,517552658	0,033333333	0,0269	0,00640615
2	0,25	8,972307692	2	6,663601947	0,066666667	0,0407	0,026007118
3	0,3	8,956944666	3	6,857142857	0,1	0,0671	0,032936979
4	0,45	8,926643724	4	6,950963222	0,133333333	0,0839	0,049422235
5	0,6	8,916408669	5	7,128712871	0,166666667	0,1242	0,042452328
6	0,75	8,843023256	6	7,170731707	0,2	0,1355	0,064545464
7	0,8	8,855421687	7	7,334004024	0,233333333	0,1856	0,047736917
8	1,2	8,709677419	8	7,363636364	0,266666667	0,1958	0,070867315
9	1,3	8,75389146	9	7,5	0,3	0,247	0,053032115
10	1,5	8,691428571	10	7,515463918	0,333333333	0,2532	0,08014255
11	1,6	8,591373439	11	7,516483516	0,366666667	0,2536	0,113062704
12	1,8	8,642857143	12	7,813112283	0,4	0,3868	0,013177177
13	2	7,363636364	13	7,9275635	0,433333333	0,4433	0,009932188
14	2,1	8,519206309	14	7,942558747	0,466666667	0,4508	0,015893635
15	2,5	8,289324068	15	8,069286453	0,5	0,5147	0,014657863
16	2,8	8,30845225	16	8,289324068	0,533333333	0,6238	0,090420505
17	2,85	7,516483516	17	8,30845225	0,566666667	0,6329	0,066244744
18	3	8,069286453	18	8,519206309	0,6	0,7279	0,127883501
19	3,2	7,5	19	8,591373439	0,633333333	0,7573	0,124015556
20	3,5	7,813112283	20	8,642857143	0,666666667	0,7773	0,110597797
21	3,6	7,942558747	21	8,691428571	0,7	0,7952	0,095168474
22	3,8	7,9275635	22	8,709677419	0,733333333	0,8017	0,068334286
23	4	7,515463918	23	8,75389146	0,766666667	0,8169	0,050223002
24	4,2	7,128712871	24	8,843023256	0,8	0,8453	0,045287934
25	4,5	7,170731707	25	8,855421687	0,833333333	0,849	0,015660967
26	4,6	7,334004024	26	8,916408669	0,866666667	0,8664	0,000306407
27	4,8	6,663601947	27	8,926643724	0,9	0,8691	0,030865603
28	5	6,857142857	28	8,956944666	0,933333333	0,8771	0,05622042
29	5,2	6,950963222	29	8,96007984	0,966666667	0,8779	0,088748136
30	5,5	6,517552658	30	8,972307692	1	0,881	0,118974858

Сума

Сума

Параметри розподілу

а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє) 8,040261809

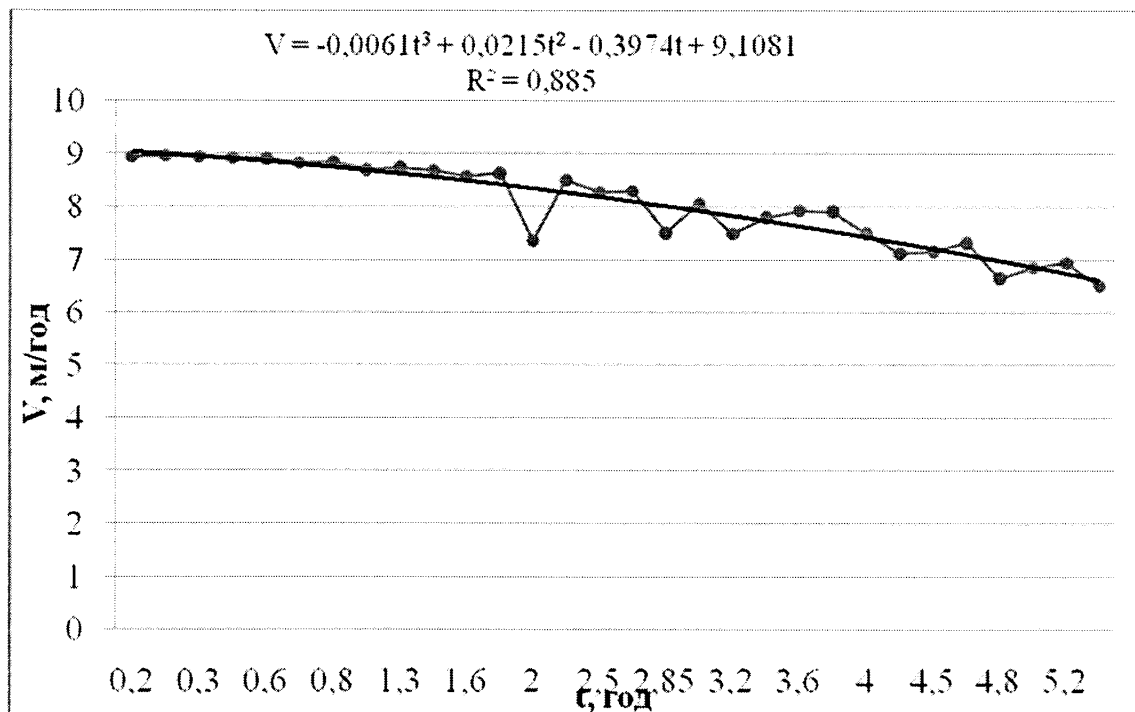
б) Оцінка генер. дисперсії S^2_x 0,623759407

в) середнє квадратичне відхилення 0,789784405

d_{max} 0,127883501

d* 0,242

Якщо $d_{max} < d^*$ (d^* - критичне значення критерію),
то ознака підпорядковується нормальному закону
розподілу



г) Долото III 215,9 СТ-ГВ (R-14), осьова сила на долото 180кН

Продовження додатку Б

Перевірка на відповідність нормального закону
розподілу за критерієм Колмогорова-Смірнова

№ з/п	t, год	U_i	№ з/п	U_i	Fх	Фх	d
1	4,25	2,146542828	1	1,568627	0,045455	0,0472	0,001697
2	8,5	2,305200341	2	1,659023	0,090909	0,115	0,024082
3	10	2,22459893	3	1,679354	0,136364	0,137	0,000596
4	12,75	2,097478992	4	1,720588	0,181818	0,1898	0,008031
5	18,25	2,039215686	5	1,770898	0,227273	0,2692	0,041885
6	22,25	1,946524064	6	1,776091	0,272727	0,2782	0,005471
7	24	1,931888545	7	1,779679	0,318182	0,2845	0,033653
8	26,5	1,882352941	8	1,784314	0,363636	0,2928	0,07083
9	30,75	1,903267974	9	1,784314	0,409091	0,2928	0,116284
10	36	1,846836848	10	1,790531	0,454545	0,3041	0,150462
11	41,75	1,779679144	11	1,822278	0,5	0,3644	0,135582
12	46,5	1,822277847	12	1,846837	0,545455	0,4136	0,131835
13	51,5	1,784313725	13	1,882353	0,590909	0,487	0,103879
14	58	1,776091082	14	1,903268	0,636364	0,5306	0,105732
15	64,75	1,659022931	15	1,931889	0,681818	0,5896	0,092214
16	70,5	1,679354095	16	1,946524	0,727273	0,6191	0,108194
17	75,5	1,784313725	17	2,039216	0,772727	0,7846	0,011862
18	78,75	2,088952654	18	2,088953	0,818182	0,8527	0,034472
19	85,75	1,720588235	19	2,097479	0,863636	0,8627	0,00095
20	90,5	1,568627451	20	2,146543	0,909091	0,9113	0,002248
21	94,75	1,790530846	21	2,224599	0,954545	0,9606	0,006015
22	102,75	1,770897833	22	2,3052	1	0,9853	0,014676

Сума

Сума

Параметри розподілу

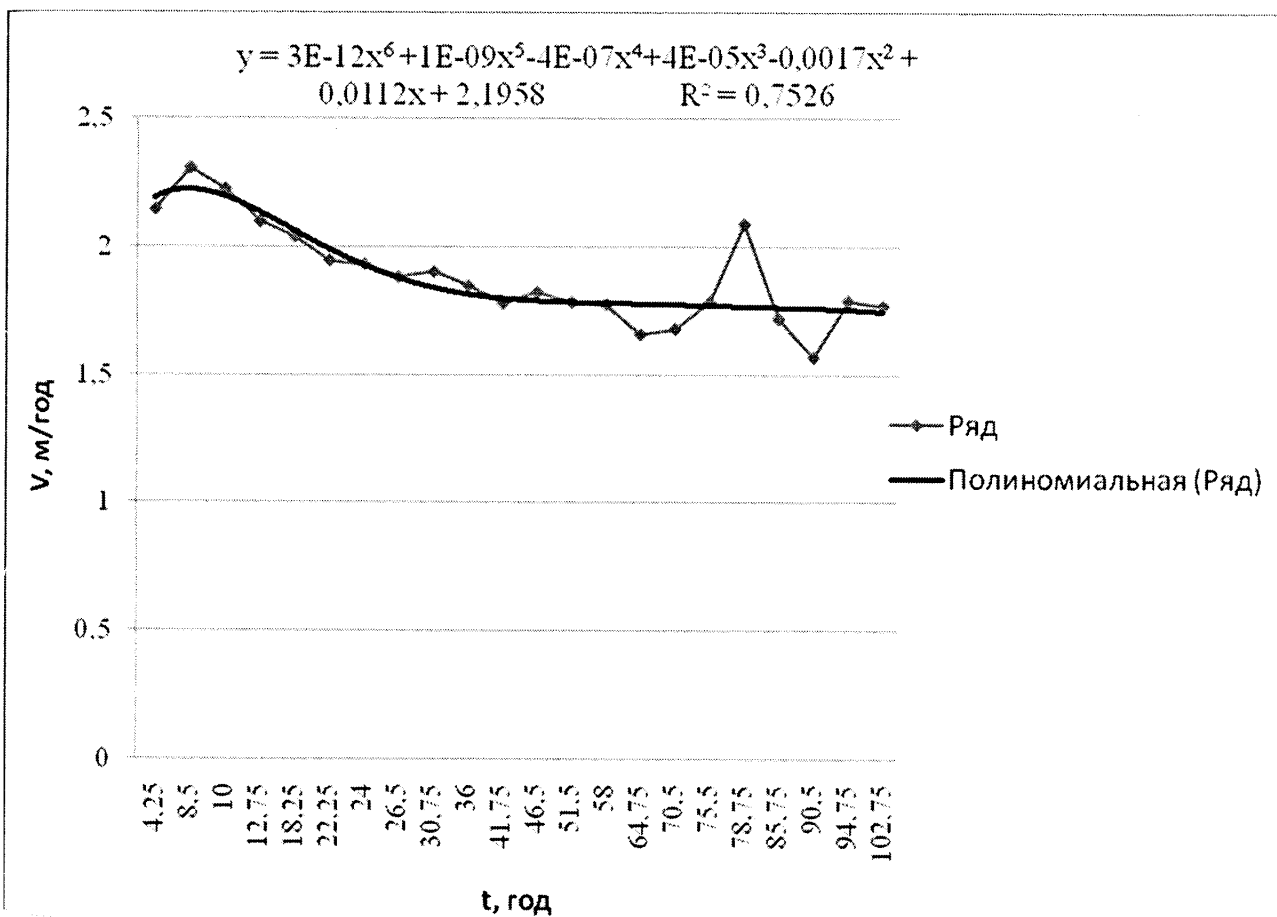
d_{max} 0,150462

а) оцінка математичного сподівання (вибіркове середнє) 1,888571

d* 0,26

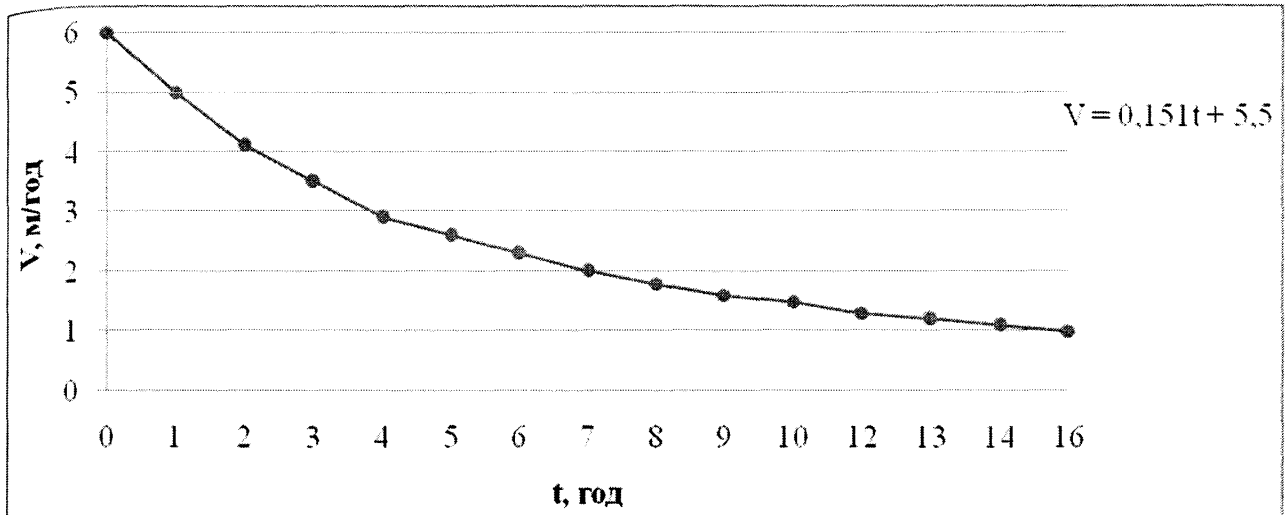
б) Оцінка генер. дисперсії S² 0,036567Якщо d_{max} < d* (d* - критичне значення критерію),
то ознака підпорядковується нормальному закону
розподілу

в) середнє квадратичне відхилення 0,191226

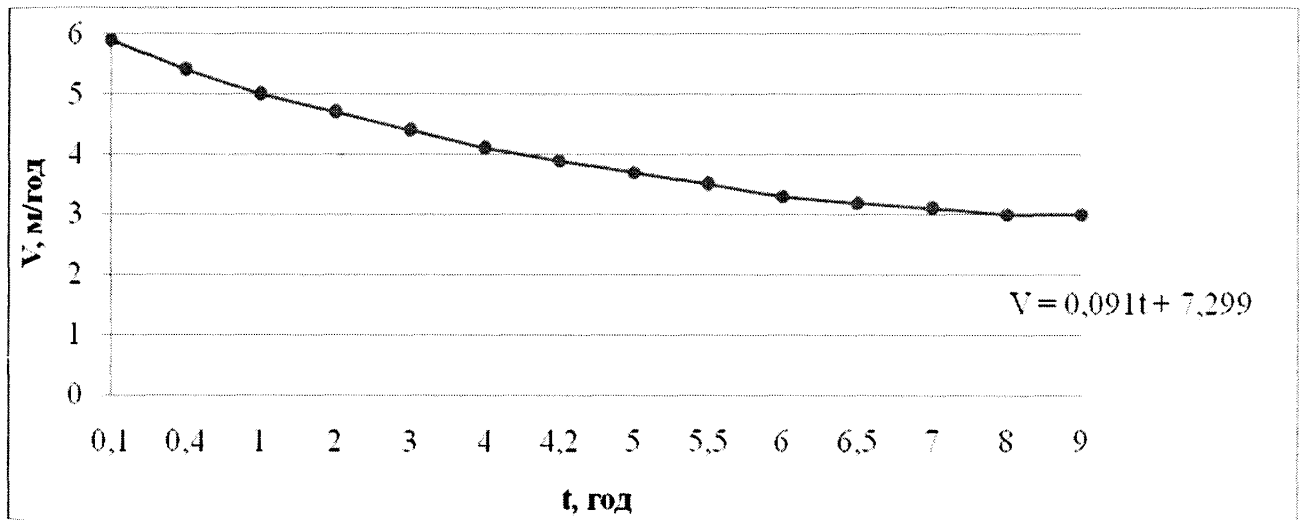


д) Долото III 215,9 С-ГН, осьова сила на долото 180кН

Продовження додатку Б

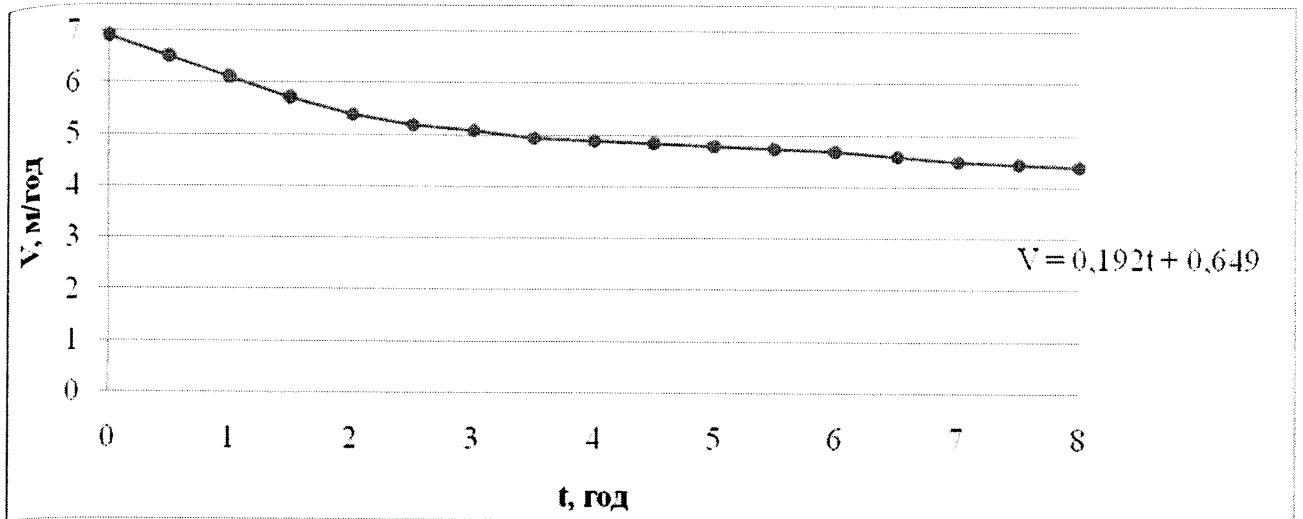


е1) Зміна в часі механічної швидкості проходки V_t при бурінні з постійною осьовою силою на долото типу III 295,3 МСЗ-ГАУ, осьова сила на долото 160кН



е2) Графіки зміни в часі механічної швидкості проходки V_t при бурінні з постійною осьовою силою на долото типу III 219,5 СЗ-ГВ, осьова сила на долото 180кН

Продовження додатку Б



е3) Графіки зміни в часі механічної швидкості проходки V_t при бурінні з постійною осьовою силою на долото типу III 215,9 СЗ-ГАУ, осьова сила на долото 180кН

Додаток В

Робочий протокол експериментального дослідження закономірностей зміни проходки і механічної швидкості буріння в умовах прикарпатського УБР ВАТ «Укрнафта»

В1. Умови проведення експерименту

1. Бурова установка
2. Спосіб буріння – роторний
3. Мета буріння – експлуатація
4. Проектна глибина – м
5. Компонент низу бурильної колони:
 - долото
 - ОБТ
6. Умови проведення активного експерименту
 - Інтервал буріння - м
 - Типи долота – 215,9 СЗ-ГВ
 - 295,3 МСВ-ГАУ
 - 215,9 С-ГН
 - 215,9 СТ-ГВ
 - 215,9 СЗ-ГАУ
 - 295,3 М-ГВ
 - 295,3 С-ГВ

Таблиця В1 - План експерименту

Параметри процесу буріння		Типорозмір долота
Осьова сила на долото F, кН	Швидкість обертання долота n, об/хв	
160	80	295,3 С-ГВ
160	80	295,3 М-ГВ
180	80	215,9 СЗ-ГАУ
180	80	215,9 СТ-ГВ

В2. Результати активного експерименту

Таблиця В2 – Зміни в часі механічної швидкості при проведенні активного експерименту

 $V_0=7,1428571$

№з/п	Час буріння t_i , ГОД	Сумарний час буріння $t_{\text{сум}}$, ГОД	Швидкість проходки за час t_i , h_i , М	Сумарна проходка $h_{\text{сум}}$, М	Механічна швидкість буріння V , М/ГОД
1	5,25	5,25	23	23	4,38
2	7	12,25	34	57	4,85
3	2,5	14,75	10	67	4
4	5,75	20,5	32	99	5,56
5	3,5	24	25	124	7,14
6	1,5	25,5	8	132	5,33
7	6	31,5	30	162	5
8	4	35,5	21	183	5,25
9	1	36,5	4	187	4
10	3,25	39,75	14	201	4,3
11	2,75	42,5	16	217	5,81
12	5,75	48,25	28	245	4,869
13	2	50,25	8	253	4
14	2,5	52,75	7	260	2,8

Продовження додатку В

 $V_0=4,210526$

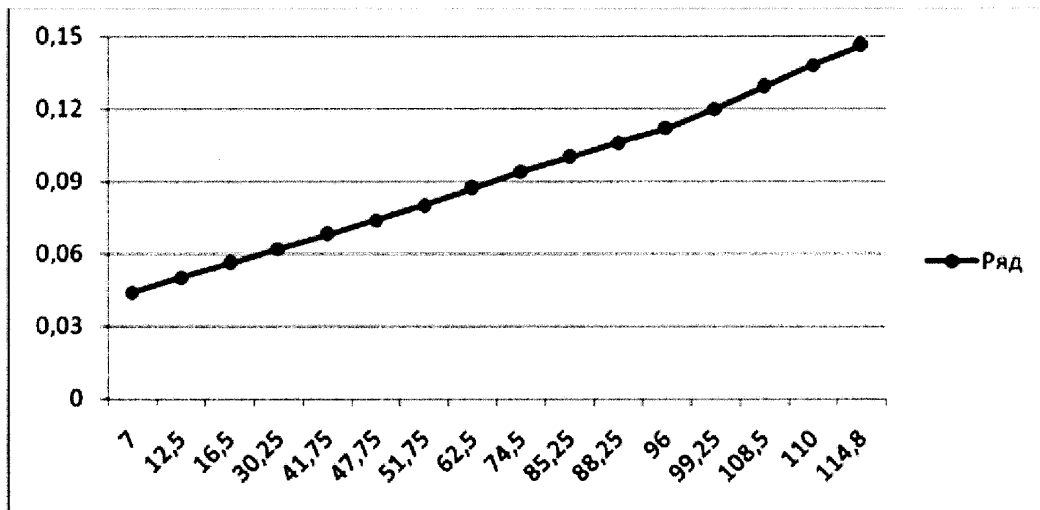
№з/п	Час буріння t_i , ГОД	Сумарний час буріння $t_{\text{сум}}$, ГОД	Швидкість проходки за час t_i , h_i , М	Сумарна проходка $h_{\text{сум}}$, М	Механічна швидкість буріння V , М/ГОД
1	5,25	5,25	11	11	2,09
2	6,25	11,5	13	24	2,08
3	6,5	18	14	38	2,15
4	7,5	25,5	13	51	1,73
5	0,5	26	1	52	2
6	7	33	16	68	2,28
7	4,75	37,75	20	88	4,21
8	2,5	40,25	5	93	2
9	6,25	46,5	12	105	1,92
10	5,25	51,75	12	117	2,28
11	3	54,75	6	123	2
12	3	57,75	6	129	2

 $V_0=3,3333333$

№з/п	Час буріння t_i , ГОД	Сумарний час буріння $t_{\text{сум}}$, ГОД	Швидкість проходки за час t_i , h_i , М	Сумарна проходка $h_{\text{сум}}$, М	Механічна швидкість буріння V , М/ГОД
1	7	7	4	4	0,57
2	5,5	12,5	3	7	0,54
3	4	16,5	3	10	0,75
4	13,75	30,25	7	17	0,5
5	11,5	41,75	6	23	0,52

Продовження додатку В

6	6	47,75	6	29	1
7	4	51,75	3	32	0,75
8	10,75	62,5	15	47	1,39
9	12	74,5	14	61	1,16
10	10,75	85,25	10	71	0,93
11	3	88,25	4	75	1,33
12	7,75	96	14	89	1,8
13	3,25	99,25	8	97	2,46
14	9,25	108,5	4	101	0,43
15	1,5	110	5	106	3,33
16	4,75	114,8	6	112	1,26



$V_0=3,058823529$

№з/п	Час буріння t_i , ГОД	Сумарний час буріння $t_{\text{сум}}$, ГОД	Швидкість проходки за час t_i , h_i , м	Сумарна проходка $h_{\text{сум}}$, м	Механічна швидкість буріння V , м/ГОД
1	4,25	4,25	10	10	2,35
2	4,25	8,5	13	23	3,05
3	1,5	10	4	27	2,66
4	2,75	12,75	6	33	2,18
5	5,5	18,25	11	44	2
6	4	22,25	7	51	1,75
7	1,75	24	3	54	1,71
8	2,5	26,5	4	58	1,6
9	4,25	30,75	7	65	1,64
10	5,25	36	8	73	1,52
11	5,75	41,75	8	81	1,39
12	4,75	46,5	7	88	1,47
13	5	51,5	7	95	1,4
14	6,5	58	9	104	1,38
15	6,75	64,75	8	112	1,18
16	5,75	70,5	7	119	1,21
17	5	75,5	7	126	1,4
18	3,25	78,75	7	133	2,15
19	7	85,75	9	142	1,28
20	4,75	90,5	5	147	1,05
21	4,25	94,75	6	153	1,41
22	8	102,8	11	164	1,37

Продовження додатку В

Дата проведення експерименту: 3 вересня – 30 жовтня 2007р.

Від ІФНТУНГ

аспірантка

Сабат Н.В.

Зав. каф. АТП і МЕ

д. т. н. проф.

Семенцов Г.Н.

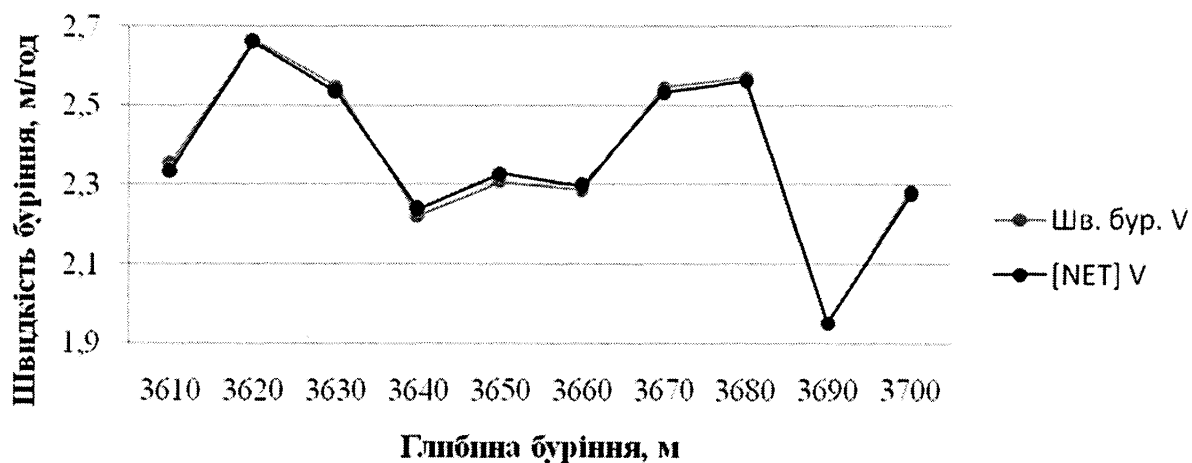
Від Прикарпатського УБР:

Головний метролог

Федорів О.І.

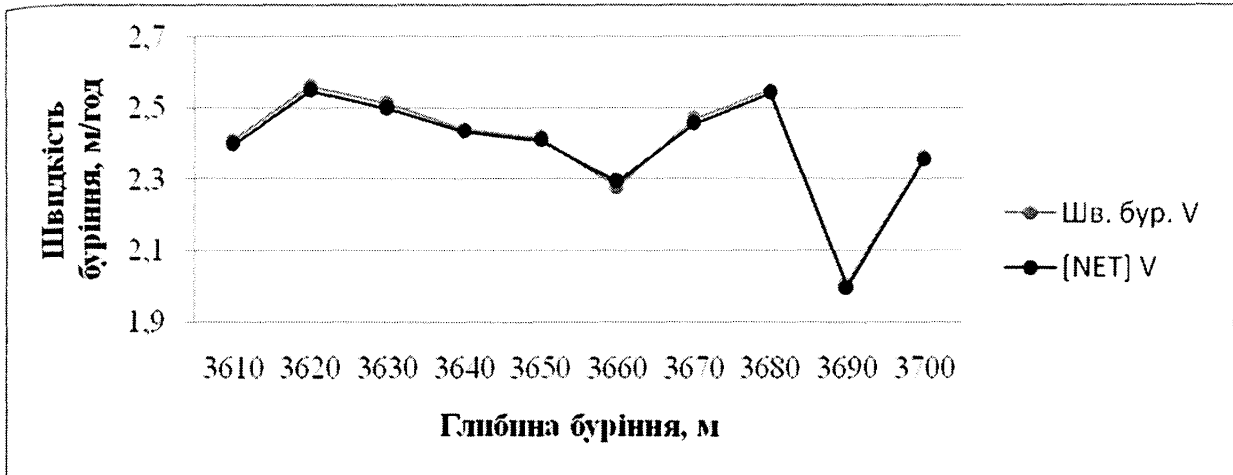
Додаток Г
Оцінки швидкості буріння на основі штучних мереж

Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,25	2,3529	0,0002	2,335690329
3620	3,75	2,6667	1,93925E-05	2,660683368
3630	3,92	2,5486	0,0001	2,533898264
3640	4,5	2,2222	0,0001	2,238772129
3650	4,33	2,3077	0,0002	2,328311945
3660	4,38	2,2857	0,0001	2,297325444
3670	3,93	2,5455	0,0001	2,532630994
3680	3,89	2,5714	4,57493E-05	2,562158776
3690	5,13	1,9512	3,88477E-07	1,952051569
3700	4,38	2,2857	0,0001	2,274739635

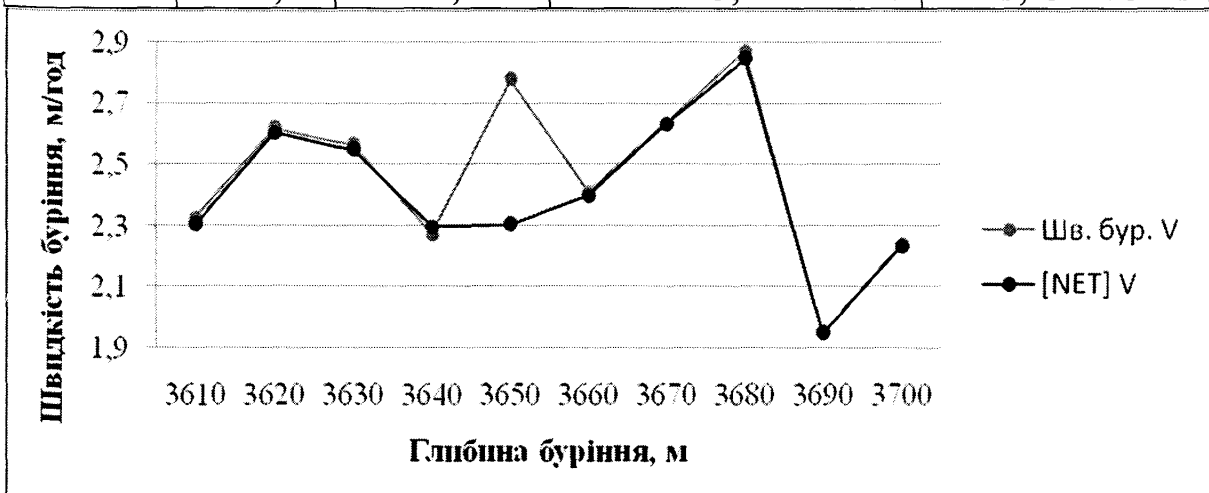


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,15	2,4096	0,0001	2,398022193
3620	3,9	2,5641	0,0001	2,548778954
3630	3,98	2,5126	0,0001	2,498783841
3640	4,1	2,439	1,36553E-05	2,433951206
3650	4,14	2,4155	2,21556E-05	2,409069
3660	4,39	2,2779	0,0001	2,293332627
3670	4,05	2,4691	0,0001	2,455524047
3680	3,92	2,551	4,37735E-05	2,541960532
3690	4,98	2,008	0,0001	1,996929271
3700	4,23	2,364	3,04911E-07	2,356455613

Продовження додатку Г



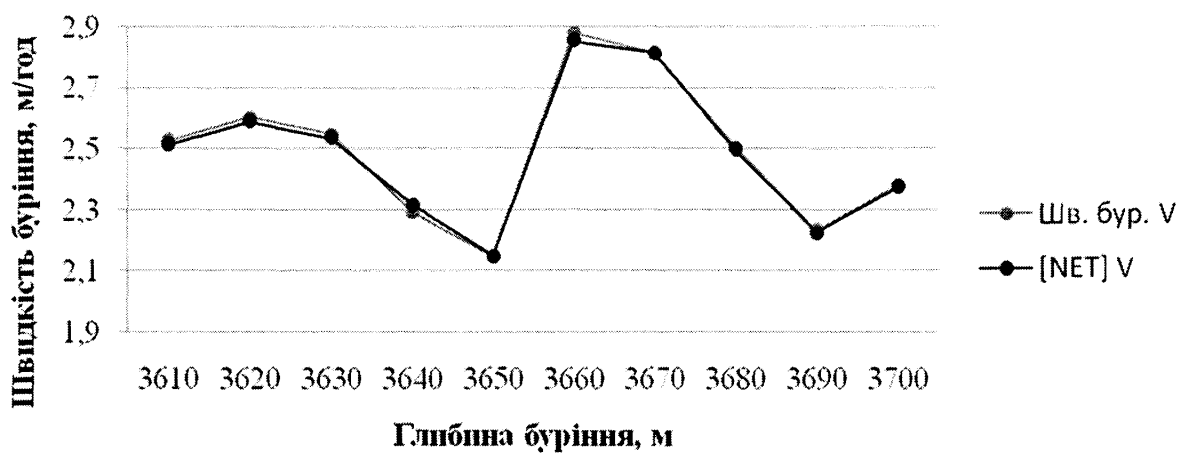
Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,3	2,3256	0,0003	2,303481967
3620	3,82	2,6178	0,0001	2,604150393
3630	3,9	2,5641	0,0002	2,546592233
3640	4,4	2,2727	0,0003	2,296905642
3650	4,39	2,7779	0,1207	2,303201476
3660	4,15	2,4096	0,0001	2,398918831
3670	3,79	2,6385	1,76689E-05	2,632756956
3680	3,48	2,8736	0,0004	2,845953709
3690	5,14	1,9455	1,06592E-05	1,949960666
3700	4,46	2,2422	3,36165E-05	2,234278392



Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	3,96	2,5253	0,0001	2,513768127
3620	3,84	2,6042	0,0001	2,589408584
3630	3,92	2,5486	0,0001	2,533898264
3640	4,36	2,2936	0,0003	2,317346416

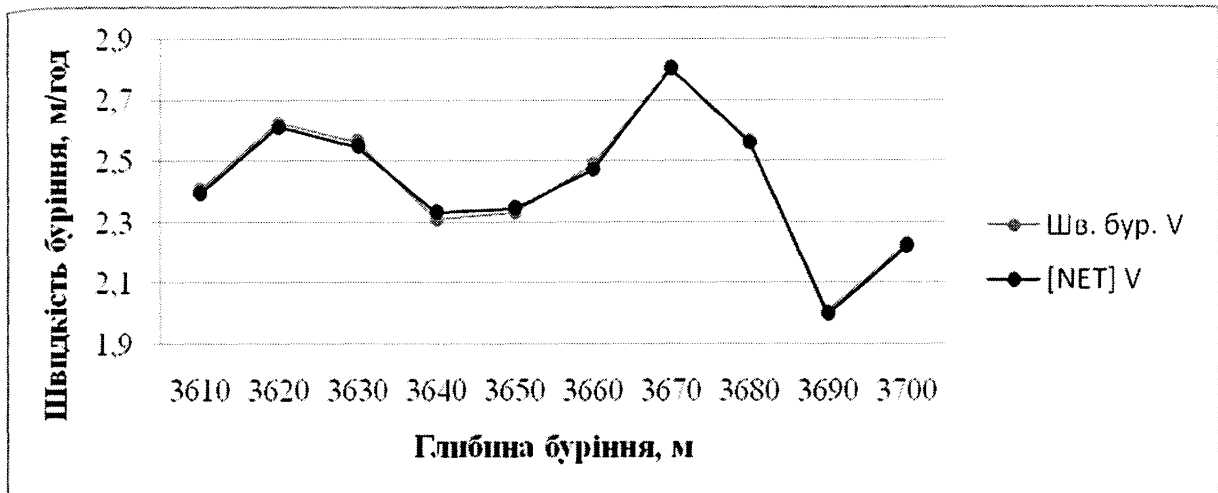
Продовження додатку Г

3650	4,66	2,1459	1,1662E-05	2,150565767
3660	3,47	2,8818	0,0004	2,853073381
3670	3,55	2,8169	1,94833E-06	2,814992923
3680	3,99	2,5063	0,0001	2,496167604
3690	4,48	2,2321	1,86678E-05	2,226196855
3700	4,2	2,381	2,7431E-05	2,373844206

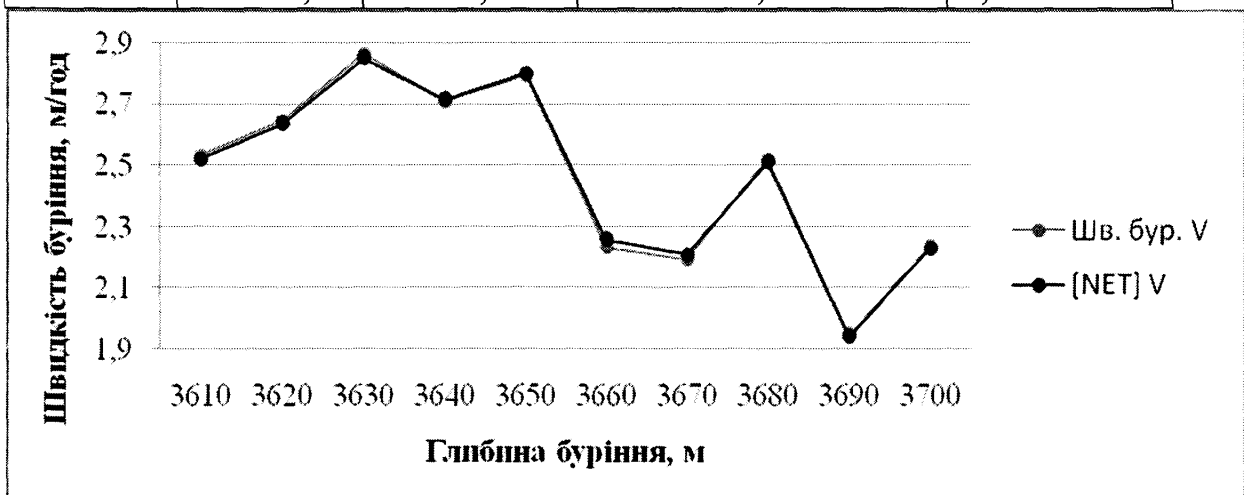


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,16	2,4038	0,0001	2,391888767
3620	3,81	2,6247	0,0001	2,611761781
3630	3,9	2,5641	0,0002	2,546592233
3640	4,33	2,3095	0,0003	2,331792117
3650	4,29	2,331	0,0001	2,344507524
3660	4,02	2,4876	0,0001	2,472228769
3670	3,57	2,8011	1,41856E-06	2,802727273
3680	3,89	2,5707	3,9081E-05	2,562158776
3690	4,98	2,008	0,0001	1,996929271
3700	4,49	2,2272	3,19643E-05	2,219475511

Продовження додатку Г

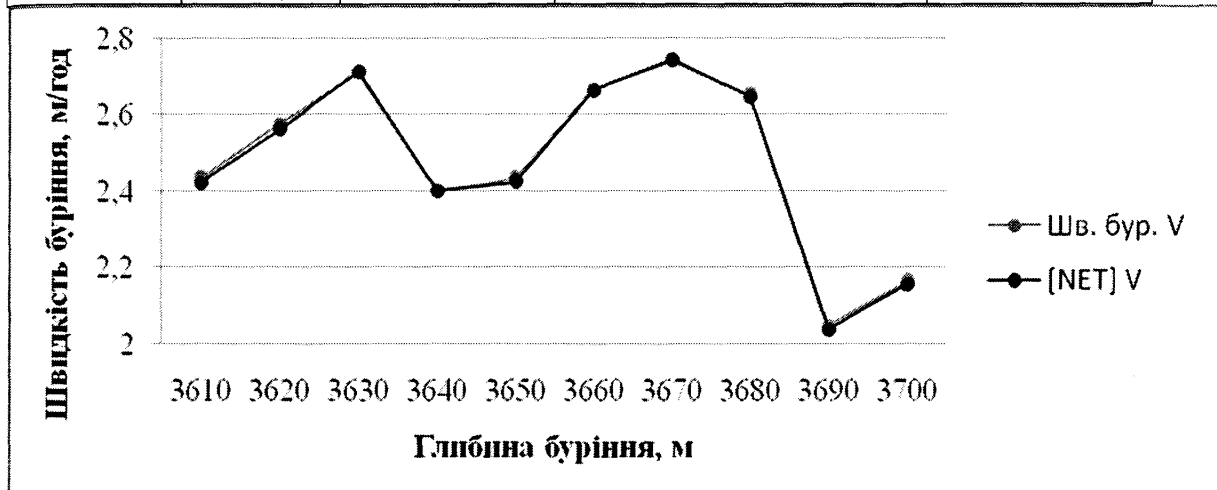


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	3,95	2,5316	0,0001	2,520043075
3620	3,78	2,6455	0,0001	2,635553111
3630	3,49	2,8653	0,0001	2,849878542
3640	3,69	2,71	1,15166E-05	2,714636604
3650	3,58	2,7933	3,33842E-05	2,801194188
3660	4,48	2,2321	0,0003	2,256158779
3670	4,56	2,1929	0,0001	2,209528591
3680	3,97	2,5189	0,0001	2,509081433
3690	5,22	1,9457	0,0002	1,936789808
3700	4,47	2,2371	3,23705E-05	2,229326591



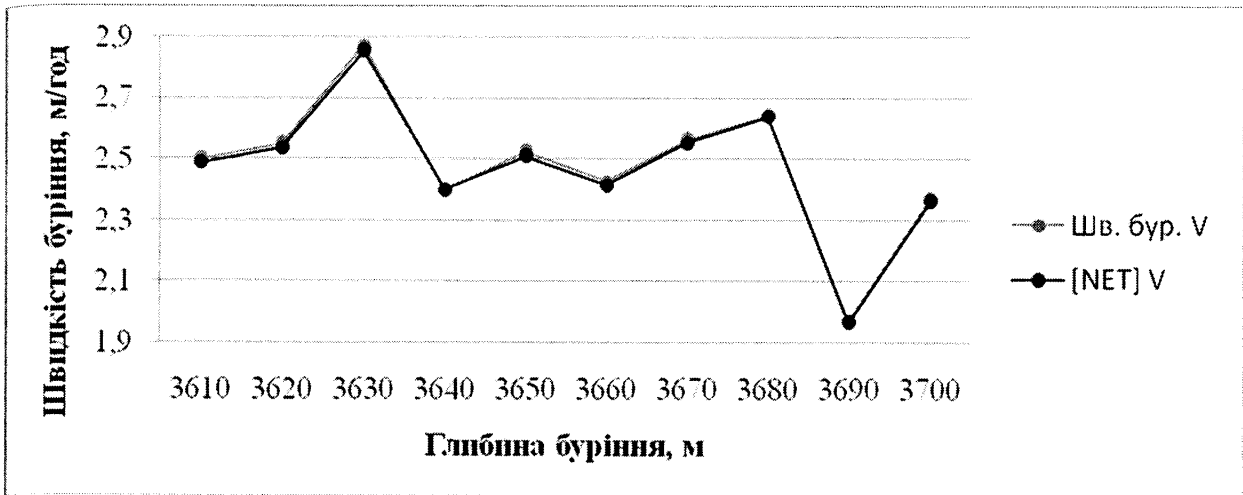
Продовження додатку Г

Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,11	2,433	0,0001	2,422400051
3620	3,88	2,5773	0,0001	2,561764118
3630	3,69	2,71	7,79597E-06	2,713814803
3640	4,17	2,3981	9,38287E-06	2,40228509
3650	4,11	2,433	4,66371E-05	2,423669547
3660	3,75	2,6666	3,33642E-05	2,664104388
3670	3,65	2,7397	1,1629E-05	2,744359163
3680	3,77	2,6525	1,0952E-05	2,647978492
3690	4,88	2,0492	0,0001	2,039049665
3700	4,62	2,1645	3,49758E-05	2,156419826

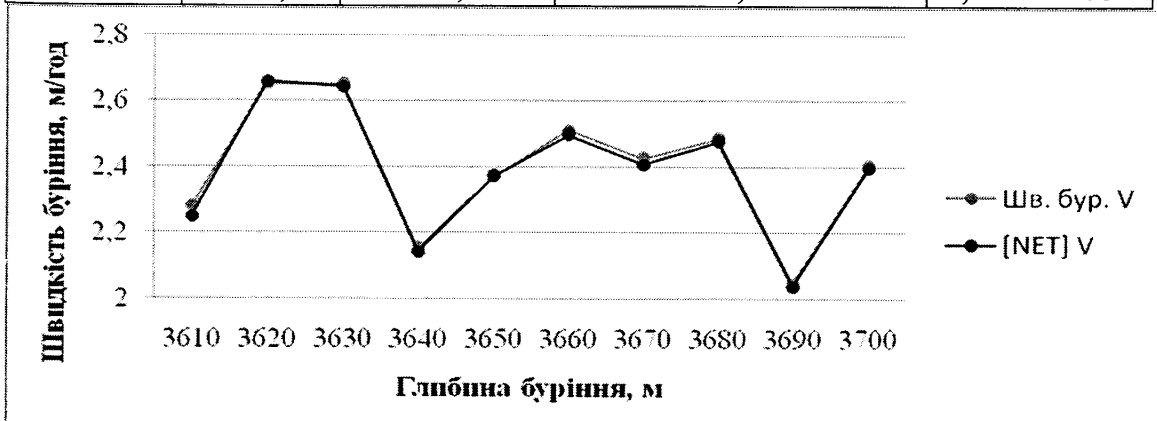


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4	2,5	0,0001	2,489065857
3620	3,92	2,551	0,0001	2,536280298
3630	3,48	2,8736	0,0002	2,853242186
3640	4,17	2,3981	9,38287E-06	2,40228509
3650	3,96	2,5253	0,0002	2,508455609
3660	4,12	2,4272	0,0001	2,414714529
3670	3,9	2,5641	0,0001	2,553034307
3680	3,78	2,6446	9,16934E-06	2,640462804
3690	5,07	1,9724	1,59747E-05	1,966939242
3700	4,22	2,3697	3,00149E-05	2,362214767

Продовження додатку Г



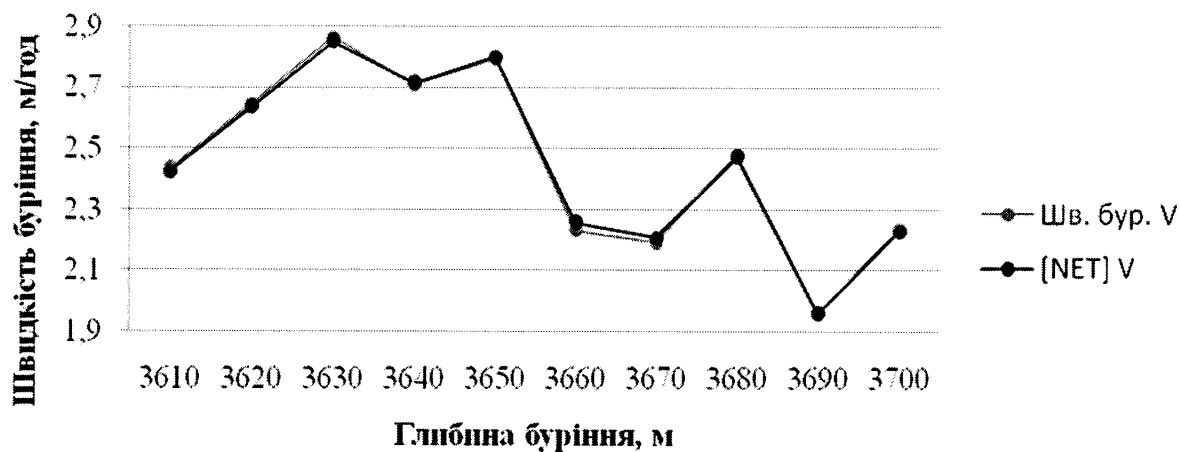
Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,38	2,2831	0,0006	2,250145684
3620	3,75	2,6525	3,58748E-05	2,660683368
3630	3,77	2,6525	4,23171E-05	2,643612184
3640	4,64	2,1551	0,0001	2,142174453
3650	4,22	2,3697	6,94772E-06	2,373301292
3660	3,98	2,5125	0,0001	2,497223205
3670	4,13	2,4271	0,0002	2,408174472
3680	4,02	2,4875	0,0001	2,477034528
3690	4,88	2,049	0,0001	2,039049665
3700	4,16	2,4038	2,11561E-05	2,397515735



Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,11	2,433	0,0001	2,422400051
3620	3,78	2,6455	0,0001	2,635553111
3630	3,49	2,8653	0,0001	2,849878542

Продовження додатку Г

3640	3,69	2,71	1,15166E-05	2,714636604
3650	3,58	2,7932	3,42353E-05	2,801194188
3660	4,48	2,2321	0,0003	2,256158779
3670	4,56	2,1929	0,0001	2,209528591
3680	4,03	2,4813	0,0001	2,470720371
3690	5,1	1,9607	1,57829E-06	1,958983552
3700	4,47	2,2371	3,23705E-05	2,229326591

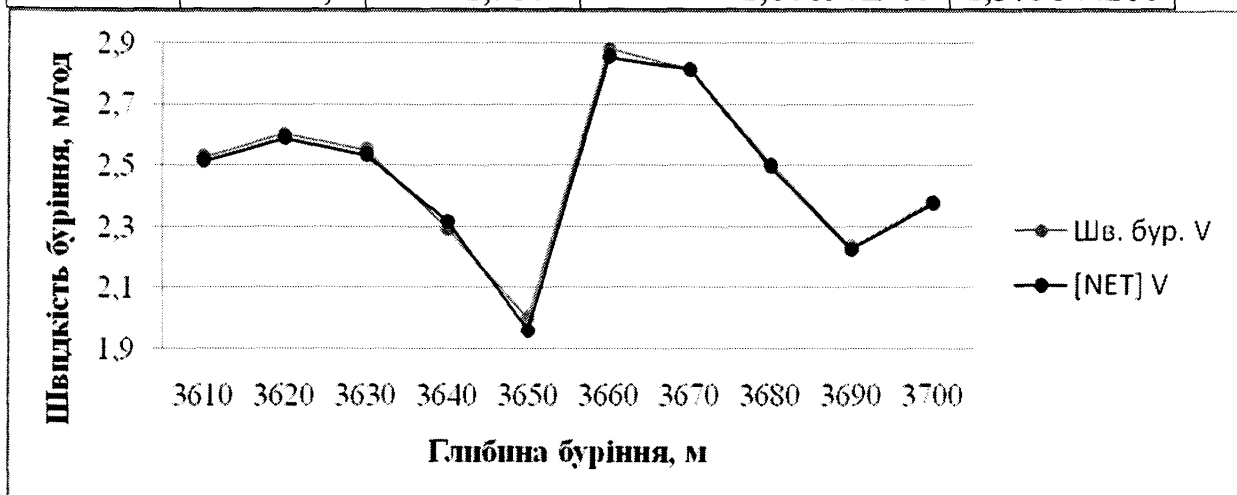


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	4,16	2,4039	0,0001	2,391888767
3620	3,81	2,624	0,0001	2,611761781
3630	3,9	2,5641	0,0002	2,546592233
3640	4,33	2,3094	0,0003	2,331792117
3650	4,29	2,331	0,0001	2,344507524
3660	4,22	2,3696	1,27521E-05	2,364721028
3670	3,57	2,8011	1,41856E-06	2,802727273
3680	3,89	2,5706	3,81713E-05	2,562158776
3690	4,98	2,008	0,0001	1,996929271
3700	4,49	2,2271	3,11421E-05	2,219475511

Продовження додатку Г

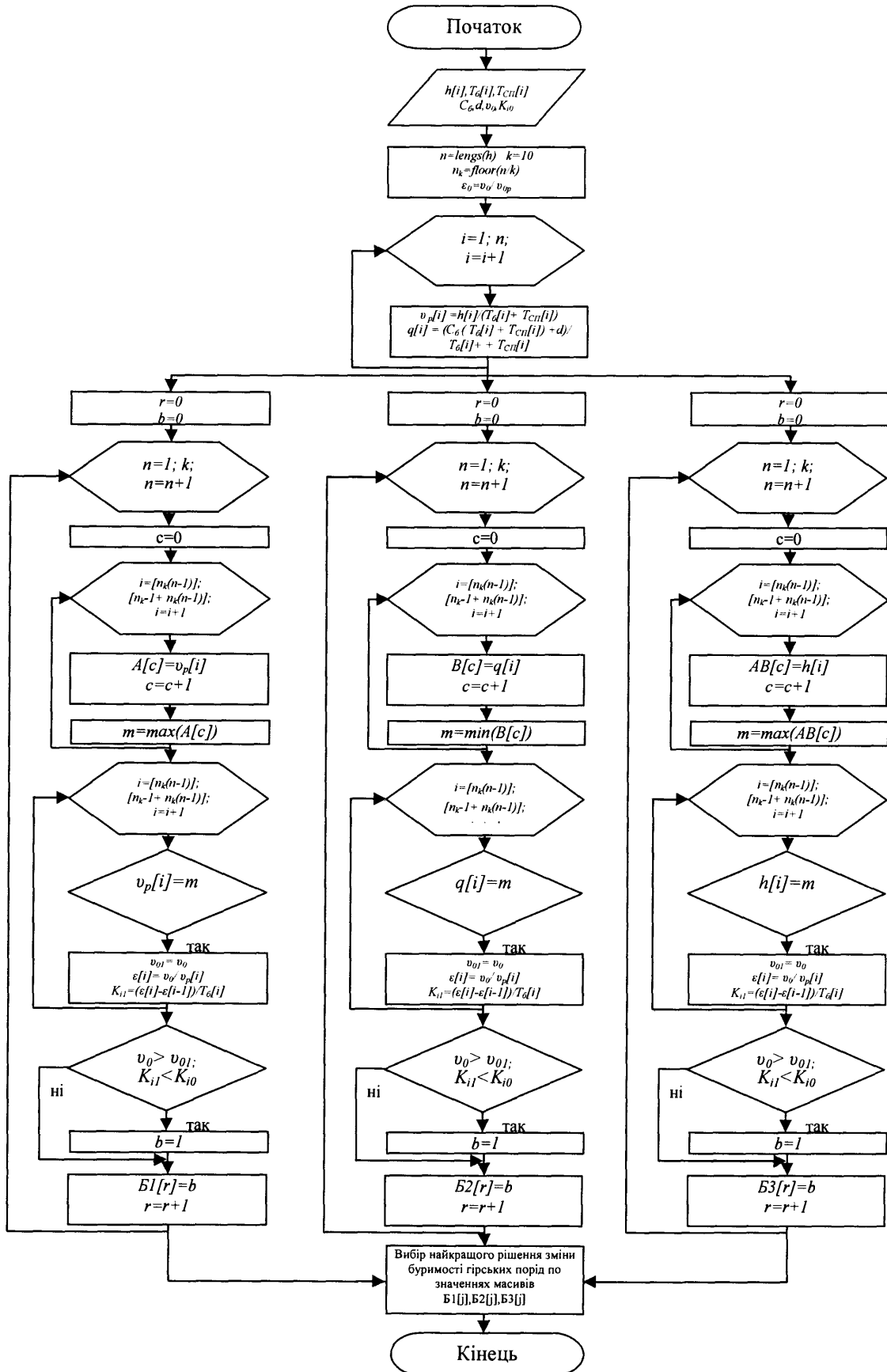


Глибина	Час бур.	Шв. бур. V	[NET] Ср. кв. похибка	[NET] V
3610	3,96	2,5252	0,0001	2,513768127
3620	3,84	2,6041	0,0001	2,589408584
3630	3,92	2,551	0,0002	2,533898264
3640	4,36	2,2935	0,0003	2,317346416
3650	5	2	0,0009	1,96000269
3660	3,47	2,8818	0,0004	2,853073381
3670	3,55	2,8169	1,94833E-06	2,814992923
3680	3,99	2,5062	0,0001	2,496167604
3690	4,48	2,2321	1,86678E-05	2,226196855
3700	4,2	2,3809	2,66697E-05	2,373844206



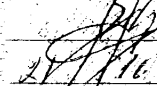
Додаток Д

Блок схема програми визначення буримості гірських порід



Додаток Е**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Начальник Прикарпатського УБР
ВАТ «УКРНАФТА»

 І.М. Федорук
2008 року.

АКТ

про впровадження матеріалів дисертації аспіранта кафедри автоматизації
технологічних процесів і моніторингу в екології
Сабат Н.В. у виробництво

**«ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ БУРИМОСТІ ПОРОДИ В
ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ»**

Ми, що нижче підписалися, представники Прикарпатського УБР ВАТ «УКРНАФТА»:

- головний інженер – Бабій А.О.
- начальник технологічного відділу – Дмитришин С.І.

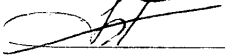
а також представники ІФНТУНГ

- науковий керівник - д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології ІФНТУНГ Семенцов Г.Н.
- аспірант кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу в екології Сабат Н.В.

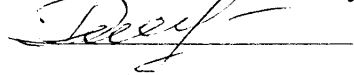
склали даний акт про те, що на бурових Прикарпатського УБР ВАТ «УКРНАФТА» протягом 2007-2008р. були проведені промислові випробування методу контролю буримості гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ, що є об'єктом дисертаційної роботи Сабат Н.В..

Розроблений метод контролю буримості гірських порід прийнятий до впровадження, що дозволить підвищити ефективність бурових робіт за рахунок збільшення проходки на долото та механічної швидкості буріння, економії породоруйнівного інструменту, зменшення часу будівництва свердловини та собівартості одного метра буріння.


Головний інженер
Прикарпатського УБР
ВАТ «УКРНАФТА»



Начальник
технологічного відділу



Науковий керівник
д.т.н., професор

 Г.Н. Семенцов

Аспірант

 Н.В. Сабат

Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТОВ СКБ ЗА



В.С. Вошинський

08.10

2008 року.

АКТ

передачі – прийому програмного та алгоритмічного забезпечення

**«ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ БУРИМОСТІ ПОРОДИ
В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ»**

Ми, що нижче підписалися, директор, к.т.н. ТОВ «Івано-Франківське бюро СКБ ЗА» Вошинський В.С., з однієї сторони та д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації технологічний процесів і моніторингу в екології ІФНТУНГ Семенцов Г.Н., аспірант кафедри Сабат Н.В., з другої сторони склали цей акт у тому, що ТОВ СКБ ЗА прийняло до впровадження програмне та алгоритмічне забезпечення «ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ БУРИМОСТІ ПОРОДИ В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ», розроблене аспірантом Сабат Н.В. Програмне та алгоритмічне забезпечення буде інтегроване у систему контролю процесом буріння.

Від ТОВ СКБ ЗА

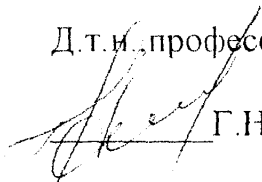
Директор, к.т.н.



В.С. Вошинський

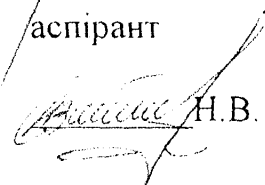
Від ІФНТУНГ

Д.т.н., професор



Г.Н. Семенцов


аспірант



Н.В. Сабат

Додаток 3**ЗАТВЕРДЖУЮ:**Ректор Івано-Франківського
національного технічного
університету нафти і газу

д.т.н. проф.

 С.І. Крижанівський7. 10 2008 року.**АКТ**

Про впровадження матеріалів дисертації аспіранта кафедри автоматизації
технологічних процесів і моніторингу в екології
Сабат Н.В. у навчальний процес

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ БУРИМОСТІ ПОРОДИ
В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ»**

Ми, що нижче підписалися, проректор, к.т.н. проф. Чеховський С.А., д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і моніторингу екології ІФНТУНГ Семенцов Г.Н. та аспірант кафедри Сабат Н.В., склали цей акт у тому, що матеріали дисертації «ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ БУРИМОСТІ ПОРОДИ В ПРОЦЕСІ ПОГЛИБЛЕННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ», розроблене аспірантом Сабат Н.В. впроваджені у навчальний процес при вивченні дисципліни «Автоматизація технологічних процесів в нафтовій і газовій промисловості» студентами спеціальності 7.092501 - автоматизоване управління технологічними процесами (модуль М1, змістовний модуль ЗМ1, навчальний елемент НЕЗ «Автоматизація процесу буріння нафтових і газових свердловин»)

Проректор

 С.А. Чеховський

Завідувач кафедри АТІІ і МЕ

д.т.н. професор

 Г.Н. Семенцов

Аспірант

 Н.В. Сабат

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.03.2006р., № 145. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi.nreg='45-2006%FO>.
2. Халявко М.П. Нафтогазовий комплекс України. Напрямки реалізації основних положень енергетичної стратегії до 2030 року / М.П. Халявко // Хімічна промисловість.– 2007.– №2. – С.3-10.
3. Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу / О.Т.Драганчук, Т.О.Пригоровська // Нафтогазова енергетика. – 2008. - №4. – С.11-14.
4. Близнюков В.Ю. Прогнозирование градиента давления гидравлического разрыва пород при разработке рациональных конструкций глубоких скважин / В.Ю.Близнюков, А.Г.Стенченко // М.:ВНИИОЭНГ. – 1989. – вып.11 (строительство скважин). – 56 с.
5. Драганчук О.Т. Науково-методологічні основи конструювання озброєння шарошкових доліт: автореф.дис.на здобуття наук.ступеня докт.техн.наук: спеі.05.05.12 «Машини нафтової та газової промисловості» / О.Т.Драганчук. – Івано-Франківськ, 1999. – 35 с.
6. Сабитов Э.Х. Применения ЭВМ при проектировании строительства скважин / Э.Х.Сабитов, А.Б.Шильман // М.: ВНИИОЭНГ.–1981. – 45 с.
7. Леонов А.И. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации процессов бурения / А.И.Леонов, К.А.Парфёнов//М.: ВНИИОЭНГ. – 1976. – 54 с.
8. Бревдо Г.Д. Проектирование режима бурения / Г.Д.Бревдо // М.:Недра. – 1988. – 200 с.
9. Маковой Н. Гидравлика бурения; [перевод с румынского] / Н.Маковой // М.:Недра. – 1986. – 537 с.

10. Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин / М.І.Горбійчук, Г.Н.Семенцов // Івано-Франківськ: Факел, 2003 – 493 с.
11. Бингхэм М.Г. Проблемы буримости горных пород / М.Г.Бингхэм // М: ВНИИОЭНГ, 1966.-126с.
12. Рябоконт С.А. Бурение скважин малого диаметра-потенциальный резерв для буровых работ/ С.А.Рябоконт, А.І.Овечкин, С.К.Шафряник, А.Ф.Косилов // Нефтяное хозяйство, 2003.– №2.–С.20-23.
13. Методическое руководство по определению и использованию показателей свойств горных пород в бурении. РД 39-3-679-82. М.:Миннефтепром, 1983.-62с.
14. Тарасевич В.И. Об уравнениях кривых проходок при бурении скважин / В.И.Тарасевич // «Нефть и газ». – 1958. - № 2. – С.20-26
15. Петров И.П. Методика классификации пород на основе их буримости и абразивности / И.П.Петров, В.Р.Цибульский, А.А.Любавин // Нефтяное хозяйство. – 1981. - № 1. – С.10-12.
16. Мирзаджанзаде А.Х. Анализ и проектирование показателей бурения / А.Х.Мирзаджанзаде, Н.А.Сидоров, С.А.Ширинзаде //М.:Недра, 1976.- 258с.
17. Геолого-технологические исследования в процессе бурения. РД 39-0147716-102-87. М.:Миннефтепром, 1987. - 274с.
18. Кулачек М.И. Самопишущий прибор для определения буримости горных пород и исследований процессов бурения / М.И.Кулачек, А.А.Жуковский, В.Д. Буткин // Горный журнал. -1969. - № 7.–С.59-60.
19. Сильвестров А.Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А.Н.Сильвестров, П.И.Чинаев // М.:Энергоатомиздат. – 1983. – 200 с.
20. Гулизаде М.П. Метод обнаружения смены пласта по буримости / М.П.Гулизаде // Известия вузов: Нефть и газ. – 1973. - №9. – С.35-36.
21. А.С.1366636 СССР Способ обнаружения пласта по буримости /

- Е.В.Калыгин, Г.А.Богаутдинов, О.Ю.Баженов, В.В.Шабалин. - №4 111052/22-03; Заявл.05.12.1986; Опубл.1986; Бюл.№2. – 8 с.
- 22.Сабат Н.В. Аналіз методів безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі буріння нафтових і газових свердловин / Н.В.Сабат // Академический вестник. – Кривой Рог. - 2005. - №15-16. – С.75-78.
23. Сабат Н.В. Математичні моделі буримості гірських порід / Н.В.Сабат // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития - 2006». Технические науки. Одесса: Черноморье. – 2006. – С.36-42.
- 24.Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород / Л.А.Шрейнер // М.: Гостоптехиздат, 1950. – 320 с.
- 25.Протодьяконов М.М. (младший). Коэффициент крепости горных пород проф. М.М. Протодьяконова / М.М.Протодьяконов // «Вопросы разрушения и давления горных пород И.Г.Д.» АН СССР, М.:Углетехиздат, 1955. – 148 с.
26. Шрейнер Л.П. Классификация горных пород по механическим свойствам / Л.П.Шрейнер, В.Д.Якушев, О.П.Петрова, А.Г.Портнова //«Нефтяное хозяйство». – 1955. - №10. –С.20-26.
27. Владиславлев В.С. Разрушение пород при бурении свважин / В.С.Владиславлев //М.: Гостоптехиздат. - 1958.- 242 с.
28. Бадалов Р.А. Кривая изменения механической скорости, проходки и её аналитическое выражение / Р.А.Бадалов // «Нефть и газ». – 1958. - №5. – С.51-58
29. Буллах Г.И. Теория процесса турбинного бурения / Г.И.Буллах М.: Гостонттехиздат. - 1958.- 240 с.
30. Ситников Н.Б. Моделирование и оптимизация процесса бурения геологоразведочных скважин: автореф.дис.на здобуття наукового

- степень докт.техн.наук: спец.05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Н.Б.Ситников. – Екатеринбург, 2000. – 41 с.
- 31.Петров И.П. Исследование режимов бурения и разработка методов и средств их оптимизации: автореф.дис.на здобуття наук.степень докт.техн.наук: спец.05.13.07: «Автоматическое управление технологическими процессами в горной промышленности» / И.П.Петров. – Свердловск. – 1975. – 48 с.
- 32.Тарасевич В.И. Определение буримости горных пород в реальных условиях разрушения – при бурении скважин / В.И.Тарасевич // Материалы научно-технической конференции буровиков Куйбышевской области (20-24 января 1959г.), Куйбышев: ЦБТИ. – 1960. – С.151-161.
- 33.Семенцов Г.Н. Некоторые аспекты изучения геологического разреза скважин в процессе бурения / Г.Н.Семенцов, М.И.Горбийчук // Известия вузов: Горный журнал. 1986. - №7. - С.79-83.
- 34.Замиховский Л.М. Исследование взаимосвязи механической скорости проходки с износом вооружения шарошечных долот: автореф.дис.на здобуття наук.степень канд.техн.наук: спец: 05.05.10 «Бурение нефтяных и газовых скважин» / Л.М.Замиховский. – Моск.инст.нефтехимической и газовой промышленности им.М.М.Губкина, 1979. – 24 с.
35. Мелик-Шахназаров А.М. Контроль глубинных параметров по данным вибрации / А.М.Мелик-Шахназаров // Нефть и газ. – 1972. - №2. – С.83-85.
- 36.Куликовский Л.Ф. Информационно-измерительные системы для управления процессом бурения / Л.Ф.Куликовский, В.И.Ушмаев // М.:Недра. – 1972. – 175 с.

37. Семенцов Г.Н. Автоматизация и средства контроля при бурении скважин / Г.Н.Семенцов, Б.Н.Локотош, С.Ф.Кукурудз, В.М.Дитчук, И.И.Думин // Ужгород: Карпаты. – 1975. – 135 с.
38. Чапланов О.П. Нейродинамічні прогнозуючі моделі в системах керування: автореф.дис.на здобуття наук.ступеня канд.техн.наук: спец.:05.13.03 «Системи та процеси керування» / О.П.Чапланов. – Харків. – 2005. – 19 с.
39. Семенцов Г.Н. Метод ідентифікації параметрів математичної моделі за умов апріорної та поточної невизначеності процесу буріння / Г.Н.Семенцов, О.В.Фадєєва // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2005. - №3(13). – С.165-169.
40. Сабирзянов С.А. О разбиении геологического разреза на интервалы одинаковы по буримости горных пород / С.А.Сабирзянов, Б.И.Шхинек / Нефтепромысловые трубы. Труды ВНИИТНефть. Вып.5. – Куйбышев. – 1974. – С.17-21.
41. Воинов Л.Г. Разбивка стратегического разреза скважин по условной твердости пород методом совмещенного механического каротажа / Л.Г.Воинов // Труды Куйбышев НИИ НП «Нефтепромысловое дело», Вып.2. – 1960. – С.11-16.
42. Беликов В.Г. О методике обработки промысловых данных в бурении методом математической статистики / В.Г.Беликов, В.А.Сарнисов, Л.А.Романова // НТС «Бурение», вып.1. – М.:ВНИИОЭНГ. – 1971. – С.25-29.
43. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении / Р.М.Эйгелес // М.:Недра. – 1972. – 232 с.
44. Козловский Е.А. Автоматизация процесса геологоразведочного бурения / Е.А.Козловский, Р.Х.Гафиятуллин // М.:Недра.–1991.– 296 с.
45. Аветисов А.Г. Новый метод оперативного контроля геологических условий скважин – основа принятия эффективных технологических

- решений. Гипотезы, поиск, прогнозы / А.Г.Аветисов, Д.А.Аветисов // Северо-Кавказское отделение инженерной академии Российской Федерации. – Краснодар. – 1992. – С.48-61.
46. Когуч Я.Р. Вимоги до математичної моделі буримості гірських порід з позицій автоматичного контролю / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2004. - №1(7). – С.49-53.
47. Семенцов Г.Н. Структура системи автоматизованого контролю для оцінки буримості гірських порід / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2005. - №3(12). – С.169-174.
48. Семенцов Г.Н. Визначення буримості гірських порід шляхом вимірювання параметрів і показників процесу буріння / Г.Н.Семенцов, Н.В.Сабат // Науковий вісник Хмельницького національного університету. – 2007. - №1. – С.181-186.
49. Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин: автореф.дис.на здобуття наук.ступеня докт.техн.наук: спец.:05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Г.Н.Семенцов. – М.- 1990. – 44 с.
50. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности / Л.А.Сена // М.:Наука. – 1977. – 335 с.
51. Кунцяк Я.В. Технічні засоби буріння нафтових і газових свердловин / Я.В.Кунцяк, Я.С.Гаврилов, Ю.В.Дубленич, Д.М.Мартинюк, Р.Є.Мрозек, В.І.Зубарев, А.І.Курінов // Нафтова і газова промисловість. – 2003. - №3. – С.20-22.
52. Петров И.П. Оценка степени износа и эффективности использования долота при вращательном бурении / И.П.Петров // Горный журнал: Известия вузов. – 1966. - №11. – С.42-46.
53. Когуч Я.Р. Контроль буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2007. - №1(15). – С.116-119.

54. Семенцов Г.Н. Промысловые исследования механической скорости бурения как функции времени / Г.Н.Семенцов, И.П.Петров, С.Ф.Кукурудз // Нефтяное хозяйство. – 1970. - №8. – С.11-14.
55. Сабат Н.В. Оцінювання властивостей гірських порід в процесі поглиблення свердловин / Н.В.Сабат // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований», том 2. Технические науки. – Одесса: Черноморье. – 2007. – С.65-69.
56. Сабат Н.В. Автоматизований контроль буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин / Н.В.Сабат // Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их развития в науке, транспорте, производстве и образовании». Технические науки. – Одесса:Черноморье. – 2005. – С.11-16.
57. Семенцов Г.Н. Визначення найбільш ймовірного моменту зміни характеристик випадкового процесу при переході долотом меж пластів гірських порід / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат, І.Я.Фіняк // Збірник наукових праць Хмельницького державного університету «Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів». – Хмельницьк, 13-16 травня 2004. – С.7-13.
58. Когуч Я.Р. Сучасні методи виявлення меж пластів гірських порід при бурінні свердловин / Я.Р.Когуч // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 1998. - №4. – С.169-171.
59. Померанц Л.И. Геофизические методы исследования нефтяных и газовых скважин / Л.И.Померанц. – М.Недра. – 1981. – 252с.
60. Фертль Ч.Х. Аномальные пластовые давления: [перев.с англ.] / Ч.Х.Фертль. – М.:Недра. – 190. – 398с.

61. Семенцов Г.Н. Метод обнаружения границ пластов при бурении скважин в осложненных условиях / Г.Н.Семенцов, М.И.Горбийчук, Я.Р.Когуч // Бурение скважин в осложненных условиях. – ДонГТУ. – Донецк. – 1996. – С.76-77.
62. Ashish Sen, Muni S.Srivastava. On multivariate tests for detecting change in mean / Sen Ashish, Muni S.Srivastava // Sankhya. – 1973. – ser.A. – v.35. - №2. – P.173-186.
63. Ashish Sen, Muni S.Srivastava. Some one-sided test for change in level / Sen Ashish, Muni S.Srivastava // Technometrics. – 1975. – v.17. - №1. – P.61-64.
64. Ashish Sen, Muni S.Srivastava. On tests for detecting change in mean / Sen Ashish, Muni S.Srivastava // Ann.of Stat. –1975.– v.3.- №1.– P.98-108.
65. Ширяев А.И. Обнаружение спонтанно возникающих эффектов / А.И.Ширяев // Докл.АН СССР. – 1961. – Т.138. - №4. – С.799-801.
66. Cobb W.G. The problem of the Nile: conditional solution to a cchange-point problems / W.G.Cobb // Biometrika. – 1978. – v.65. – №2. – P.243-251.
67. Hinkley D.V. Inference about the cchange-point in a sequence of random variables / D.V.Hinkley // Biometrika. – 1970. – v.57. – №1. – P.1-17.
68. Hinkley D.V., Hinkley E.A. Inference about the cchange-point in a sequence of binomial variables / D.V.Hinkley, E.A.Hinkley // Biometrika. – 1970. – v.57. – №3. – P.477-488.
69. Шалтяните В. Вычисление момента изменения авторегрессивной последовательности, измеряемой с помехами / В.Шалтяните // Статистические проблемы управления. Вильнюс: Ин-т математики и кибернетики АН ЛитССР. – 1978. Вып.31. – С.31-42.
70. Davis M.H. The applicftion of nonlinear filtering to fault detection in lincar systems / M.H.Davis // IEEE Trans. Automat. Control. – 1975. – v.AC-20. - №2. – P.257-259.
71. Телькснис В.А. Определение наиболее вероятного момента времени

- изменения характера случайного процесса / В.А.Телькснис, В.Ю.Черняускас // Тр.1 Восес.симп.по статистическим проблемам в технической кибернетике. Нелинейные и оптимальные системы. – М.:Наука, 1971. – С.223-228.
72. Петров И.П. Автоматизация процесса вращательного бурения / И.П.Петров, Н.Б.Ситников // Свердловск: Издание горного института. – 1970. – 76 с.
73. Кропивницька В.Б. Оптимальне керування процесом буріння нафтових і газових свердловин з дискретно-неперервною зміною керувальних дій: автореф.дис.на здобуття наук.ступ.канд.техн.наук: спец.:05.13.07 – автоматизація технологічних процесів / В.Б.Кропивницька. – Івано-Франківськ. – 2007. – 20 с.
74. Воцинський В.С. Модернізований комплекс засобів наземного контролю і керування процесом буріння нафтових і газових свердловин СКУБ-М2 / В.С.Воцинський, В.А.Ролик // Нафтова і газова промисловість. – 2004. - №3. – С.24-29.
75. Семенцов Г.Н. Автоматизований контроль меж пластів гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ / Г.Н.Семенцов, Я.Р.Когуч // Івано-Франківськ: Факел. – 1998. – 204 с.
76. Бородюк В.П. Статистические методы в инженерных исследованиях: [учеб.пособие под ред.Круга Г.К.] / В.П.Бородюк, А.П.Воцинин, А.З.Иванов // М.:Высшая школа. – 1983. – 216 с.
77. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений) / Н.В.Смирнов, И.В.Дунин-Борковский // М.:Недра. – 1965. – 342 с.
78. Закс Л. Статистическое оценивание / Л.Закс // М.:Сатистика. – 1976. – 351 с.
79. Кропивницька В.Б. Стратегія ідентифікації параметрів математичної моделі процесу буріння / В.Б.Кропивницька, Н.В.Сабат //тези доп.

- Першої міжнародної наукової конференція. 25-27 травня 2005 р. – К.: нац.авіаційний університет. - 2005. – С. 106-108.
80. Ушмаев В.И. Централизованный контроль технологических процессов бурения / В.И.Ушмачев. – Москва: ВНИИОЭНГ. – 1972. – 75 с.
81. Газанов Р.А. Разработка автоматизированной системы для прогнозирования показателей бурения на основе нейронных моделей / Р.А.Газанов, Г.Н.Меджидов, Р.Б.Алекперов, К.С.Керимов, Н.А.Меджидов // Нефтяное хозяйство . – 2001. - №10. – С.40-42.
82. Ziedenberg M. Neural networks in artificial intelligence / M.Ziedenberg. – New-York: Ellis Horward. – 1990. – 348p.
83. Мельник М.П. Досвід буріння св.152 Яблунівського ГКР з горизонтальним закінченням стовбура / М.П.Мельник, М.М.Мельник, Я.С.Яремійчук, О.М.Блажило, В.Л.Кушнарьов, В.Г.Кельченко, П.С.Палюк, В.А.Боков, К.Г.Лазаніко // Нафтова і газова промисловість. -2005. - №1. – С.34-35.
84. Хмелева С.Н. Разработка и применение систем для замера параметров в процессе бурения / С.Н.Хмелева // Бурение, разработка и эксплуатация газовых и морских нефтяных месторождений в зарубежных странах. – М.: ВНИИОЭГ Газпром. – 1988. – С. 1-12.
85. Система наземного контролю процесу буріння нафтових і газових свердловин БУР-САК // Технічний опис. Інструкція по експлуатації. - Івано-Франківськ . – 2002. - 98 с.
86. Система контролю управління процесом проводки нефтяних і газових скважин «Леуза – 1» // «Геофизика». М.- 2002. - 102 с.
87. Когуч Я.Р. Розробка критерію оцінки буримості порід в реальному часі / Я.Р.Когуч // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. - №4(9).- С. 88-93.
88. Геолого-технологические исследования в процессе бурения. РД 39-0147716-102-87. М.:1987. - 274с.

89. Kuntz P. An Ant Clustering Algorithm Applied to Partitioning in VLSI Technology / P. Kuntz, P.Layzell // MIT Press. – in Proceeding of Fours European Conference on Artificial Life – 1997. –P.417-424/
90. Руденко О.Г. Основи теорії искусственных нейронних мереж / О.Г.Руденко, Е.В.Бодянский // Харьков: Телетех, 2002. – 317 с.
91. Когуч Я.Р. Автоматизоване визначення буримості гірських порід на основі інформації про технологічні параметри та показники процесу буріння свердловин на нафту і газ / Я.Р.Когуч, Сабат Н.В. // Академический вестник (КроТОМАКНС). - 2004. - №13. - С.17-20.
92. Haykin S. Neural networks. F Comprehtnsive Foundation. – Upper Saddle River, N.I.: Prentice Holl, Inc, 1999. – 842p.
93. Ту Дж, Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / Пер с англ.: под ред. И.Ю.Журавлева. – М.:Мир, 1978. – 411 с.
94. Павленко В.Д. Информационная технология диагностики нелинейных динамических объектов с использованием рядов Вольтера / В.Д.Павленко, А.А.Фомин // Вєник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: збірн.наук.праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. - №5. – С.67-74.
95. Soto-Ilic M., Iain C. Innovations in Fuzzy Clustering. – Berkin-Htidelbtrg/ - New-Yuork: Springer, 2006. – 152p.
96. Бодянский Е.В. Гетерогенная фаззи-спейк-нейронная сеть в задече кластеризации / Е.В.Бодянский, А.И.Долотов // Доклади Хвміжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2008», 23-26 вересня 2008 року. – Одеса: ОНМА. – т.3. – С.3-6.
97. Миранян В.И. Новые разработки в области контроля и управления наклонно-направленным бурением / В.ИМ.Миранян, В.Р.Иоанисян, В.Н.Щукин, Е.Я.Лапига // Бурение. - №2. – 2002. – С.12-16.

98. Померанц Л.И. Газовый каротаж / Л.И.Померанц. – М.: Недра.– 1982. – 240с.
99. Комплексная методика классификации горных пород геологического разреза, разделения его на характерные сечения пород и выбор рациональных типов и конструкций шарошечных долот для эффективного разбуривания нефтяных и газовых меторождений: РД 39-2-52-78. Утв Зам.министра нефтяной промышленности 10.02.1978. – М.: 1980. – 287 с.
100. Белоконь С.В. Оперативное управление процессов бурения скважин по данным комплекса «Геосервис» / С.В.Белоконь // Нефтяное хозяйство. - №3. – 2001. – С.39-41.
101. Когуч Я.Р. Удосконалення системи контролю і управління процесом буріння «GeoVox» для діагностування стану долота / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат, Г.Я.Процюк, О.В.Калічак // Наукові вісті Галицької академії. - №1(9). - 2006. – С.37-40.
102. Лугумянов М.Г. Система удаленного контроля и управления процессом строительства скважин / М.Г.Лугумянов, А.Б.Гусев, Д.В.Артемов // Научно-технический вестник «Каротажник». – вып.5-6. – 2005. – С.1-7.
103. Лугумянов М.Г. Применение информационной системы «Geo Vox» для решения задач автоматизации строительства скважин / М.Г.Лугумянов, А.Б.Гусев, Д.В.Артемов // Научно-технический вестник «Каротажник». – вып.111-112. – 2003. – С.1-7.
104. А.С. 876971 СССР, МКИ Е 21 В44/00. Устройство для определения обработки долота / Г.Н.Семенцов, М.И.Когутяк, Я.Р.Когуч, опубл. 1987. – Бюл.№40; заявл. и опубл. 1987 - № 40 – с. 137.
105. Когуч Я.Р. Система підтримки прийняття рішень для управління процесом буріння свердловин в умовах невизначеності / Я.Р.Когуч,

- М.М.Дранчук, Н.В. Сабат // Вісник технологічного університету Поділля. - №2, ч. 1, том 3. – 2004. – С.29 – 32.
106. Байдюк Б.В. Физико-механические основы процессов бурения скважин / Б.В.Байдюк. – М.:ИРЦ Газпром, 1993. – 77 с.
107. Мавлютов М.Р. Разрушение гонных пород при бурении скважин / М.Р.Мавлютов. – М.:Недра, 1978. – 353 с.
108. Колесников Н.А. Процессы разрушения горных пород и пути ускорения бурения / Н.А.Колесников // / Обзор.инф.сер.Бурение, вып.5(88). – М.:ВНИИОЭНГ. – 1985. – 42с.
109. Бепликов В.Г. Рациональная отработка и износостойкость шарошечных долот / В.Г.Бепликов, С.А.Постащ. – М.:Недра, 1972. – 160 с.
110. Алексеев Ю.Ф. Современные методы прогнозирования физико-механических свойств горных пород показателей работы долота / Ю.Ф.Алексеев. – М.:ВНИИОЭНГ, 1973. – 62 с.
111. Семенцов Г.Н. Алгоритм обнаружения момента смены пласта разбуриваемой породы / Г.Н.Семенцов, М.И.Горбийчук, А.А. Шаповал / Изв.вузов: Горный журнал. – 1978. - №5. – С.29-34.
112. Яремійчук Р.С. Ідентифікація процесу руйнування гірських порід під час буріння свердловин внаслідок дії ультразвукової кавітації / Р.С.Яремійчук // Нафтова і газова промисловість.– 2000. - №3.– С.15-16.
113. Шапиро Д.И. Математические методы в проблеме принятия решения (Препринт) / Д.И.Шапиро. – М.:НСК, 1974. – 49 с.
114. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / С.Оптнер. – М.:Советское радио, 1969.– 215с.
115. А.С. 1002906. Устройство для определения границ залегания горных пород различной буримости и износа алмазной коронки /

- Е.А.Козловский, М.А.Комаров, В.М.Питерский, Е.И.Павлов, А.А.Сотников. №3518053/22-03; заявл.03.12.82; опубл.15.07.84. Бюл.№36.
116. А.С. 482556 Способ определения крепости горных пород / Б.Н.Кутузов, Т.А.Дозоров. №1957876/22-3; заявл. 31.08.73; опубл. 30.08.75. Бюл.№32.
117. А.С.825878. Устройство для определения крепости пород / А.В.Сахаров. №1800283/22-03; заявл.13.0672; опубл.30.04.81. Бюл.№16.
118. Палагушкин В.А. Автоматизация производственных процессов / В.А.Палагушкин // Уфа: УНИ. – 1976. – 52 с.
119. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы / М.П.Цапенко. – М.:Энергия. – 1974. – 319 с.
120. Мирзаджанзаде А.Х. Математическая теория экспериментов в добыче нефти и газа / А.Х.Мирзаджанзаде, Г.С.Степанова. – М.:Недра. – 1977. – 228 с.
121. Тер-Хачатуров А.А. Измерительные системы в нефтяной промышленности / А.А.Тер-Хачатуров. – М.: Недра. – 1981. – 315 с.
122. Семенцов Г.Н. Оцінка поточних значень буримості гірських порід / Г.Н.Семенцов, Н.В.Сабат // Збірник тез доповідей VII міжнар.наук.-техн.конф. «Приладобудування 2008: стан і перспективи», 22-23 квітня 2008р. м.Київ, ПБФ, НТУУ «КПІ» . – 2008. – С.263-264.
123. Когуч Я.Р. Контроль витрати промивного агента в процесі буріння свердловин на нафту і газ / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат // Збірник тез доповідей п'ятої всеукр.наук.-практ.конф. «Вимірювання витрати та кількості газу», 23-25 жовтня 2007р., Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2007. – 38с.
124. Сабат Н.В.Теоретичні засади контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин / Н.В.Сабат //

- Сборник науч.трудов по материалам междунар.науч.-практ. Конф. «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2007», 1-15 октября 2007г., том 3, техн.науки. – Одесса: Черноморье, 2007. – С.29-32.
125. Когуч Я.Р. Оцінка поточних значень буримості гірських порід / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат // Методи та прилади контролю якості. – 2007. – №19. - С.83-88.
126. Семенов Г.Н. Метод автоматизованого определения буримости горных пород в процессе углубления скважин / Г.Н.Семенов, Н.В.Сабат // Научно-технический и практический журнал «Оралдын Ғылым жаршысы» (Казахстан), №3(II). – 2008. – С.88-90.
127. Семенов Г.Н. Оценка буримости горных пород бесконтактным методом / Г.Н.Семенов, Н.В.Сабат // Современный научный вестник (Россия), №18(26). – 2007. – С.46-54.
128. Сабат Н.В. Метод контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин / Н.В.Сабат // Академический вестник. – Кривой Рог. – 2007. - №19. – С.52-53.
129. Когуч Я.Р. Вплив технологічних параметрів на достовірність контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин на нафту і газ: збірник тез доповідей 6-тої наук.-техн.конф.: «Приладобудування 2007: стан і перспективи», Київ, 24-25 квітня 2007р. / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат. – Київ. – 2007. – С.275-276.
130. Сабат Н.В. Система автоматизованого контролю гірських порід на базі технологій Data Mining: збірник тез доповідей 5-тої наук.-техн.конф.: «Приладобудування 2006: стан і перспективи», Київ, 25-26 квітня 2006р. / Н.В.Сабат. – Київ. – 2006. – С.258-259.
131. Когуч Я.Р. Діагностування системи контролю за процесом буріння свердловин на нафту і газ: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф.

- «Витратометрія 2005: вимірювання витрати і кількості газу»: Івано-Франківськ, 17-20 травня 2005р. / Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат. – Івано-Франківськ. – 2005. – 26 с.
132. Сабат Н.В. Система кластерного аналізу буримості гірських порід на базі безконтактного контролю в реальному часі: збірник тез доповідей 5-тої міжнар.наук.-техн.конф. і виставки: «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтопромислового обладнання», Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008р. / Н.В.Сабат, Г.Н.Семенов, Я.Р.Когуч. – Івано-Франківськ. – 2008. – С.184-187.
133. Сабат Н.В. Автоматичний контроль буримості гірських порід: матеріали доповідей 5-тої міжнар. наук.-техн. конф.: «Наукові дослідження та експеримент 2009», Полтава, 18-20 травня 2009р. / Н.В.Сабат. – Полтава. – 2009. – С.75-79.
134. Когуч Я.Р. Автоматизована система контролю бури в скелях гірських порід із корекцією витрати бурового розчину: матеріали доповідей Всеукр. наук.-техн. конф.: «Витратометрія 2005: вимірювання витрати та кількості газу», Івано-Франківськ, 17-20 травня 2005р. // Я.Р.Когуч, Н.В.Сабат. – Івано-Франківськ. - 2005. – С.106-108.

