

Математичне моделювання та обчислювальні методи

УДК 519.25

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-20(76)-114-137

МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗМІНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ЗАКІНЧЕНИХ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

В. М. Мойсишин, А. П. Івасютин, В. В. Тирлич

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380(3422)71-72-31; e-mail: math@nung.edu.ua*

Сучасні бурові установки, наприклад буровий комплекс Ultra Single 150, розроблений канадською компанією Sense EDM, оснащені контрольно-вимірювальними приладами, монітори яких знаходяться в приміщенні пульта управління бурового майстра, і їх використання дозволяє проводити фіксацію дискретних значень усіх технологічних параметрів процесу буріння з кроком дискретизації 1м заглиблення свердловини. Для закінчених нафтових і газових свердловин ці значення зберігаються у відповідному банку даних на електронних носіях.

Фіксація зміни технологічних параметрів буріння дозволяє аналізувати вплив використання сучасних технологій на процес руйнування гірських порід. Для проведення такого аналізу необхідно виділяти однорідні ділянки заглиблення свердловини за прийнятим критерієм буріння, наприклад за зміною механічної швидкості буріння.

Авторами розроблено методику обробки результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених свердловин. Запропоновано програму App.2 для визначення однорідних за бурилістю ділянок свердловини, яка розроблена в програмному середовищі Visual Studio на мові програмування «С#» (Сі Шарп) за допомогою фреймворку «Windows Form Application» з використанням операційних систем Windows.

Особливість цієї методики полягає в тому, що для однорідних за бурилістю ділянок поглиблення перевіряється узгодженість з нормальним законом розподілу дискретних значень вибірок основних технологічних параметрів, до яких відносяться механічна швидкість буріння

(критерій буримості), осьове статичне навантаження на долото, обертовий момент ротора установки, частоти обертання ротора і долота та статистичні характеристики цих вибірок. Належність однорідних ділянок заглиблення свердловини до однієї генеральної сукупності визначається за результатами перевірки статистичних параметричних гіпотез для всіх наведених вище технологічних параметрів. При відхиленні хоча б однієї параметричної гіпотези про рівність дисперсій і середніх значень порівнюваних вибірок дискретних значень цих параметрів гіпотеза про належність однорідних лінійних ділянок до інтервалу з однаковими фізико-механічними характеристиками гірської породи відхиляється.

Ключові слова: технологічні параметри процесу руйнування гірських порід, критерій буримості, статистичні параметричні гіпотези, поглиблення свердловини, генеральна сукупність.

1. Вступ

Особливість будови гірської породи, яка характеризується текстурою та структурою, полягає в її анізотропності. Анізотропність – це неоднакові за величиною фізико-механічні властивості породи (наприклад, твердість по штампу) визначені в різних напрямках. Згідно [1] коефіцієнт варіації при різних видах експериментальних досліджень, проведених в однакових гірських породах, сягає 20...40%. За результатами досліджень руйнування гірських порід зубчастими вінцями, проведених Сімоновим В.В. і Вискребцовим В.Г. [2], коефіцієнт варіації дорівнював 15%. Великі значення коефіцієнта варіації для характеристик фізико-механічних властивостей гірської породи суттєво впливають на результати впровадження новітніх технологій у процес руйнування гірських порід.

Визначення меж між пластами гірських порід можна проводити трьома методами: прогноз розподілу інтервалу гірських порід на однакові (за буримістю) ділянки до початку буріння, під час буріння і після буріння [3]. Всі ці методи є наближеними, оскільки можливість отримання неперервної інформації про межу пластів в процесі буріння відсутня.

Метою статті є розробка методики аналізу результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин, використання якої дозволило б установити основні закономірності процесу руйнування гірських порід.

Базовим варіантом для досягнення такої мети прийнята методика обробки аналогових записів проходки на долото, одержаних під час проведення стендових експериментальних досліджень на буровому стенді ІФНТУНГ [4, 5]. Авторами запропоновано варіант адаптації цієї методики для аналізу результатів процесу буріння за даними закінче-

них нафтових і газових свердловин, який на відміну від базового враховує зміну всіх технологічних параметрів.

Запропонована методика працює з даними закінченої свердловини. До цих даних відноситься геологічний журнал (ГЖ), в якому наведено відомості про літологічні характеристики, склад і процентний вміст складників гірської породи у відібраному шламі, і таблиця фіксації (з кроком дискретизації 1 м заглиблення свердловини) протягом всього процесу буріння зміни основних технологічних параметрів, до яких відносять осьове навантаження на долото F_d , тс; обертовий момент ротора $T_{об.р}$, кН·м, частоту обертання ротора n_p , хв⁻¹; частоту обертання долота n_d , хв⁻¹ і механічну швидкість буріння $V_{мех}$, м/год.

Геологічні дослідження за відібраним шламом проводяться не у всьому діапазоні буріння, а тільки під час буріння під технічні колони. Інтервал відбору шламу в цьому діапазоні становить 10 м. При бурінні в прогнозованому продуктивному горизонті цей інтервал зменшується до 5 м, а інколи і до 1 м.

Значення технологічних параметрів буріння закінченої свердловини у досліджуваному діапазоні її поглиблення рекомендується наводити у вигляді таблиць: за відсутності геологічних досліджень у табл. 1, за наявності результатів геологічних досліджень у табл. 2.

Таблиця 1. Значення технологічних параметрів в аналізованому інтервалі буріння закінченої свердловини за її поглибленням

№	Глибина, м	Навантаження на долото F_d , тс	Обертовий момент ротора $T_{об.р}$, кН·м	Частота обертання ротора n_p , хв ⁻¹	Частота обертання долота n_d , хв ⁻¹	Механічна швидкість буріння $V_{мех}$, м/год

Таблиця 2. Значення технологічних параметрів в аналізованому інтервалі буріння закінченої свердловини за її поглибленням і результатами геологічних досліджень

№	Глиби- на, м	Навантажен- ня на долото F_d , тс	Оберто- вий момент ротора $T_{об.р}$, кН·м	Частота обертан- ня ротора n_p , хв ⁻¹	Частота обертан- ня долота n_d , хв ⁻¹	Механіч- на швидкість буріння $V_{мех}$, м/год.	Інтер- вал відбору шламу за ГЖ

Перший етап (варіант 1). Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за даними табл. 1

Буримістю породи вважається комплексна характеристика, яка враховує основні геологічні та техніко-технологічні фактори і визначає податливість породи руйнуванню. Згідно цього означення основним показником буримості можна вважати механічну швидкість буріння.

Однорідною ділянкою поглиблення свердловини називається ділянка інтервалу пробуреної свердловини для якої залежність $H_B = f(T_B)$, де H_B – інтервал заглиблення свердловини з кроком дискретизації 1м, T_B – час буріння цього інтервалу в хвилини, відповідає емпіричному рівнянню лінійної регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

1. Формування об'єму вибірки пар значень H_B і T_B

Формування вибірки пар значень H_B і T_B ділянки заглиблення свердловини починається з початкового значення аналізованого інтервалу свердловини. Значення першої пари T_B і H_B рівні нулю.

Мінімальний об'єм вибірки – п'ять пар значень, включаючи і нульову, що відповідає чотириметровому інтервалу буріння. На думку авторів для триметрового інтервалу, що підтверджено в [3], можна вважати «апріорі» залежність між значеннями T_B і H_B лінійною.

Час буріння ΔT_B метрового кроку дискретизації заглиблення визначається за величиною механічної швидкості буріння цього кроку ΔV_{MEX}

$$\Delta T_B = \frac{\Delta H_B}{\Delta V_{MEX}} = \frac{1\text{м}}{\Delta V_{MEX} (\text{м} / \text{год})} = \frac{1}{\Delta V_{MEX}} (\text{год}) = \frac{60}{\Delta V_{MEX}} (\text{хв}). \quad (1)$$

Значення інтервалу буріння, механічної швидкості і часу буріння для цього інтервалу подаємо у вигляді табл. 3.

Таблиця 3. Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина свердловини за метровим інтервалом дискретизації, м	xxx	...	...		ууу
Проходка H_B , м	0	1	2	3	4
$V_{MEX,i}$, м/год	0				
Час буріння метрового інтервалу свердловини ΔT_B , хв	0				
Загальний час буріння T_B , хв	0				

2. Визначення коефіцієнтів емпіричного рівняння лінійної регресії

$$H_B = A \cdot T_B + B$$

Для знаходження коефіцієнтів A і B рівняння регресії обчислюються величини, наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Величини для визначення коефіцієнтів A і B рівняння регресії

№	$T_{B,i}$	$T_{B,i}^2$	$H_{B,i}$	$H_{B,i}^2$	$T_{B,i} H_{B,i}$
1	0	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...
n					
Сума					

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i}}{\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_{B,i} \right)^2}, \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n H_{B,i} - A \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \right). \quad (3)$$

3. *Перша умова лінійності емпіричного рівняння регресії – перевірка адекватності рівняння значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за методом однофакторного дисперсійного аналізу*

Як правило рівняння регресії підбираються за незначними об'ємами вибірок даних. За таких об'ємів нормальність розподілу функції y при фіксованому значенні аргументу x важко перевірити. В цьому випадку, замість перевірки нормальності розподілу y перевіряють гіпотезу лінійності, тобто нульову гіпотезу виду $H_0: A=0$ проти альтернативної – $H_A: A \neq 0$, де A – коефіцієнт емпіричного рівняння регресії, що визначається за формулою (2).

Якщо гіпотеза H_0 приймається, то емпіричне рівняння регресії $y = f(x)$ не може вважатись лінійним, тобто змінні y і x є незалежними випадковими величинами [6].

Одним із варіантів перевірки нульової гіпотези $H_0: A=0$ є метод однофакторного дисперсійного аналізу, який оперує з величинами, наведеними в табл. 5.

Таблиця 5. Величини для перевірки адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії значенням T_B і H_B за методом однофакторного дисперсійного аналізу

№	$H_{B,i}$	$H_{B,P,i}$	$(H_{B,i} - H_{B,P,i})^2$	$(H_{B,i} - \bar{H}_B)^2$	$(H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$
1	0				
Сума			$\sum (H_{B,i} - H_{B,P,i})$	$\sum (H_{B,i} - \bar{H}_B)$	$\sum (H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$

В табл. 5 $H_{B.P.i}$ – дискретне значення проходки на долото, визначене за емпіричним рівнянням лінійної регресії $H_B = A \cdot T_B + B$, $\bar{H}_B$ – середнє значення вибірки значень $H_{B.i}$.

Вираз $\sum (H_{B.i} - \bar{H}_B)^2$ – це загальна сума квадратів відхилень значень $H_{B.i}$, яка позначається через D . Кількість ступенів вільності ν_1 (різниця між кількістю n пар значень T_B і H_B та кількістю констант, встановлених у результаті цих дослідів, незалежно одна від одної) – $\nu_1 = n - 1$.

Вираз $\sum (H_{B.P.i} - \bar{H}_B)^2$ – це сума квадратів регресії, що характеризує розсіювання значень $H_{B.i}$, яке виникає внаслідок лінійної регресії між значеннями T_B і H_B і позначається через K . Цю суму можна представити рівнянням $\sum (H_{B.P.i} - \bar{H}_B)^2 = A^2 \cdot \sum_{i=1}^n (H_{B.i} - \bar{H}_B)^2$, тобто маємо тільки одну одиницю незалежної інформації A , або один ступінь вільності, $\nu_2 = 1$.

Вираз $\sum (H_{B.i} - H_{B.P.i})^2$ – це залишкова сума квадратів регресії, яка характеризує незворотне розсіювання значень $H_{B.i}$ за емпіричним рівнянням регресії і позначається через C . Ця сума базується на кількості ступенів вільності, яка дорівнює різниці між кількістю спостережень n і кількістю параметрів, що оцінюються (коефіцієнти A і B рівняння регресії), $\nu_3 = n - 2$.

Оцінка значущості емпіричного рівняння лінійної регресії здійснюється за допомогою F -критерію Фішера. За цим критерієм висувається нульова гіпотеза – коефіцієнт регресії рівняння A дорівнює нулю ($H_0: A=0$), тобто фактор T_B не впливає на результат H_B . Нульова гіпотеза не підтверджується за умови

$$F_{СП} = \frac{K / \nu_2}{C / \nu_3} = \frac{K / 1}{C / (n - 2)} \geq F_{KP(\alpha; \nu_2; \nu_3)}.$$

Тут $F_{СП}$ – спостережуване значення критерію Фішера, $F_{KP(\alpha; \nu_2; \nu_3)}$ – критична точка розподілу критерію Фішера, яке визначається прийнятим рівнем значущості α і ступенями вільності $\nu_2=1$ та $\nu_3=n-2$. Якщо ж $F_{СП} < F_{KP(\alpha; \nu_2; \nu_3)}$, то нульова гіпотеза підтверджується, рівняння регресії не може вважатись лінійним, тобто T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

4. Друга умова лінійності емпіричного рівняння регресії – перевірка адекватності рівняння значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за значенням емпіричного коефіцієнта кореляції

Другий поширений метод перевірки лінійності функції регресії базується на визначенні емпіричного коефіцієнта кореляції r і перевірці

нульової гіпотези $H_0: r=0$. Якщо нульова гіпотеза відхиляється, то рівняння регресії має лінійний вигляд. Якщо гіпотеза H_0 приймається, то емпіричне рівняння регресії $y = f(x)$ не може вважатись лінійним, тобто змінні y і x є незалежними випадковими величинами [6].

Емпіричне (спостережуване) значення коефіцієнта кореляції знаходимо за формулою

$$r_B^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right]^2}{\left[\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2 \right]}. \quad (4)$$

Спостережуване значення критерію Стюдента

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}}. \quad (5)$$

Нульова гіпотеза не підтверджується за умови $T_{СП} \geq T_{KP(\alpha; k)}$. Число ступенів вільності для критерію Стюдента $k=n-2$.

За умови $T_{СП} < T_{KP(\alpha; k)}$ нульова гіпотеза підтверджується. В цьому випадку рівняння регресії нелінійне, тобто T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

5. Третя умова лінійності емпіричного рівняння регресії – перевірка адекватності рівняння значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за основною похибкою емпіричного рівняння лінійної регресії

Основна похибка апроксимації значень T_B і H_B емпіричним рівнянням лінійної регресії визначається за формулою

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{C}{n-1}}. \quad (6)$$

При виконанні умови $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ емпіричне рівняння лінійної регресії адекватно описує залежність між досліджуваними величинами [7]. При $\sigma_0 = 0,1\bar{H}_B$ потрібно збільшити об'єм вибірки на одне значення і перевірити умови лінійності. За умови $\sigma_0 > 0,1\bar{H}_B$ регресія між величинами T_B і H_B відсутня.

Для перевірки умов лінійності емпіричного рівняння регресії розроблена програма App.2 в програмному середовищі Visual Studio на мові програмування «C#» (Сі Шарп) за допомогою фреймворку «Windows Form Application», що дає можливість створювати програми для операційних систем Windows.

Порядок роботи з програмою App.2

1. Відкрити App.1 застосунок (Exe файл).

2. В вікні Form 1 ввести кількість експериментальних точок ($n = 4 \dots 30$) для підбору рівнянь регресії.

The screenshot shows a window titled 'Початкова сторінка' (Initial page). Inside, there is a text prompt 'Введіть кількість точок від 4 до 30' (Enter the number of points from 4 to 30). Below this prompt is a text input field containing the number '30'. Underneath the input field is a button labeled 'підтвердити !' (confirm!).

Рис. 1. Вікно введення кількості експериментальних точок

3. В наступному вікні потрібно ввести вхідні дані (дробова частина відділена від цілої комою) для обчислення значень параметрів.

The screenshot shows a window titled 'Form_2'. It contains a grid of input fields for entering data. The grid is organized into three columns and ten rows. Each row represents a data point, with columns for the integer part (x), the fractional part of x (y), the integer part of y (x), the fractional part of y (y), and the integer part of the function value (y), and the fractional part of the function value (y). The labels for each column are: 1. x, 2. y, 3. x, 4. y, 5. x, 6. y, 7. x, 8. y, 9. x, 10. y. At the bottom right of the grid is a button labeled 'обчислити' (calculate).

Рис. 2. Вікно введення значень функції y і заданого аргументу x (вхідні дані)

Якщо одна з умов лінійності емпіричного рівняння регресії не виконується, то формується нова вибірка пар значень H_B і T_B , починаючи з другої пари аналізованого інтервалу заглиблення. Значення цієї пари H_B і T_B рівні нулю.

Для цього варіанту вибірки перевіряються три умови лінійності відповідності емпіричного рівняння регресії лінійній моделі. Якщо од-

на з умов лінійності емпіричного рівняння регресії на виконується, то формується нова вибірка пар значень H_B і T_B , починаючи з третьої пари аналізованого інтервалу заглиблення. Значення цієї пари T_B і H_B рівні нулю. Цей цикл повторюється до виконання всіх трьох умов лінійності.

Якщо всі три умови лінійності емпіричного рівняння регресії виконуються, то об'єм n початкової вибірки збільшується на одну пару дискретних значень H_B і T_B , тобто об'єм нової вибірки складає $n'=n+1$. Отже об'єм вибірки послідовно збільшується на одне значення з перевіркою умов лінійності. При певному об'ємі цієї вибірки можливе невиконання однієї або декількох умов лінійності. На цьому виділення лінійної ділянки заглиблення свердловини завершується.

Формування вибірки для виділення наступної лінійної ділянки починається зі значення глибини свердловини, на якій закінчилась перша лінійна виділена ділянка. Значення пари T_B і H_B для цього заглиблення рівні нулю і початковий об'єм вибірки рівний п'яти. Подальше формування вибірки проводиться за наведеним вище алгоритмом. Таким методом проводиться аналіз усього вибраного інтервалу заглиблення.

Приклад виділення лінійної (умовно однорідної) ділянки пробуреної свердловини

В табл. 6 подано значення проходки на долото, механічної швидкості і часу буріння для аналізованого інтервалу заглиблення свердловини.

Таблиця 6. Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в десятиметровому геологічному інтервалі свердловини Ужгородська-104

H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{\text{мех.п}}$, м/ГОД	-	10,71	13,34	2,34	39,61	7,84	9,64	25,03	37,16	22,83	13,06
ΔT_B , хв	0	5,60	4,50	25,64	1,51	7,66	6,22	2,40	1,61	2,63	4,60
T_B , хв	0	5,6	10,1	35,74	37,25	44,91	51,13	53,53	55,14	57,77	62,37

Починаючи з початкового значення проходки на долото (значення T_B і H_B рівні нулю) формуємо перший варіант вибірки пар дискретних значень T_B і H_B (об'єм вибірки – п'ять пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення свердловини – 0...4 м). Нижче наведено обчислення всіх величин, за якими перевіряються три умови лінійності залежності $H_B = f(T_B)$.

Перевірка трьох умов лінійності за алгоритмом, наведеним у методиці аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння

Визначення коефіцієнтів емпіричного рівняння лінійної регресії
 $H_B = A \cdot T_B + B$.

Для знаходження коефіцієнтів A і B рівняння регресії обчислюються величини, наведені в табл. 7.

Таблиця 7. Величини для визначення коефіцієнтів A і B рівняння регресії

№	$T_{B,i}$	$T_{B,i}^2$	$H_{B,i}$	$H_{B,i}^2$	$T_{B,i} H_{B,i}$
1	0	0	0	0	0
2	5,6	31,36	1	1	5,6
3	10,1	102,01	2	4	20,2
4	35,74	1277,3476	3	9	107,22
5	37,25	1387,5625	4	16	149
Сума	88,69	2798,2801	10	30	282,02

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i}}{\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n T_{B,i})^2} = \frac{282,02 - \frac{88,69 \cdot 10}{5}}{2798,2801 - \frac{(88,69)^2}{5}} = \quad (7)$$

$$= \frac{104,64}{1225,09688} \approx 0,08541;$$

$$B = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n H_{B,i} - A \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i}) = \frac{1}{5} (10 - 0,08541 \cdot 88,69) \approx 0,4850. \quad (8)$$

Значення коефіцієнтів A і B заокруглюються до п'яти знаків після коми.

Перевірка адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за методом однофакторного дисперсійного аналізу

Для проведення перевірки за цим методом обчислюються величини, наведені в табл. 8.

Таблиця 8. Величини для перевірки адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії методом однофакторного дисперсійного аналізу за значеннями T_B і H_B

№	H_B	$H_{B,P,i}$	$(H_{B,i} - H_{B,P,i})^2$	$(H_{B,i} - \bar{H}_B)^2$	$(H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$
1	0	0,485	0,235225	4	2,295225
2	1	0,9633	0,001347	1	1,074747
3	2	1,3391	0,436789	0	0,436789
4	3	3,5376	0,289014	1	2,364214
5	4	3,6665	0,111222	4	2,777222
Сума	10		C=1,073597	D=10	K=8,948197

Точність обчислень значень величин у табл.8: $H_{B,P,i}$ – чотири знаки після коми; $(H_{B,i} - H_{B,P,i})^2$ і $(H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$ – шість знаків після коми.

Значення $H_{P,i}$ визначаються за емпіричним рівнянням лінійної регресії:

$$H_{P,1} = AT_{B,1} + B = 0,08541 \cdot 0 + 0,485 = 0,485;$$

$$H_{P,2} = AT_{B,2} + B = 0,08541 \cdot 5,6 + 0,485 = 0,96329 \approx 0,9633;$$

$$H_{P,3} = AT_{B,3} + B = 0,08541 \cdot 10,1 + 0,485 \approx 1,3391;$$

$$H_{P,4} = AT_{B,4} + B = 0,08541 \cdot 35,74 + 0,485 = 3,53755 \approx 3,5376;$$

$$H_{P,5} = AT_{B,5} + B = 0,08541 \cdot 37,25 + 0,485 = 3,66652 \approx 3,6665.$$

Середнє значення інтервалів заглиблення визначається за формулою

$$\bar{H}_B = \frac{\sum_{i=1}^n H_{B,i}}{n} = \frac{10}{5} = 2.$$

Спостережуване значення критерію Фішера

$$F_{СП} = \frac{K / \nu_2}{C / \nu_3} = \frac{K / 1}{C / (n - 2)} = \frac{8,94819671 / 1}{1,07359671 / (5 - 2)} = 25,00. \quad (9)$$

Точність обчислення значень величини $F_{СП}$ – два знаки після коми.

Перевірка лінійності рівняння регресії $H_B = 0,08541 \cdot T_B + 0,485$ за методом однофакторного дисперсійного аналізу полягає в перевірці нульової гіпотези $H_0: A=0$. Гіпотеза про лінійність рівняння регресії не підтверджується, якщо виконується умова про рівність нулю коефіцієнта регресії A . Така умова має вигляд: $F_{СП} < F_{KP(\alpha; \nu_2; \nu_3)}$.

На сьогоднішній день не існує методики, за якою на основі математичної теорії можна було б визначити відповідну для конкретного випадку величину рівня значущості. При виборі величини рівня значущості під час перевірки нульової гіпотези керуються рекомендаціями, наведеними в [6, 8, 9], згідно яких експериментатор може вибрати, на свій розсуд, залежно від вимог до результатів експериментів, одне з стандартних значень $\alpha=0,005; 0,01; 0,05; 0,1$. Для цих рівнів у відповідних таблицях наведено критичні значення статистичних критеріїв. Авторами для перевірки нульових гіпотез прийняте значення рівня значущості $\alpha=0,01$, тобто ймовірність відхилення правильної гіпотези H_0 становить 1% (для 100 варіантів вибірок T_B і H_B тільки для одного відхилити гіпотезу H_0 було б невірним рішенням).

Оскільки $\nu_2=1$, $\nu_3=n-2=5-2=3$, то при $\alpha=0,01$ $F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117$.

Отже, при $\alpha=0,01$ $F_{СП} = 25,005 < F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117$, нульова гіпотеза $H_0: A=0$ не відхиляється і емпіричне рівняння регресії не може вважатись лінійним.

Перевірка адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за значенням емпіричного коефіцієнта кореляції

Знаходимо емпіричне значення коефіцієнта кореляції за формулою

$$\begin{aligned}
 r^2 &= \frac{\left[\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n T_{B,i})^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n H_{B,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n H_{B,i})^2 \right]} = \\
 &= \frac{\left[282,02 - \frac{88,69 \cdot 10}{5} \right]^2}{\left[2798,2801 - \frac{(88,69)^2}{5} \right] \cdot \left[30 - \frac{10^2}{5} \right]} = \\
 &= \frac{104,64^2}{1225,09688 \cdot 10} \approx 0,8938 \rightarrow r = 0,9454.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Спостережуване значення критерію Стюдента

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9454 \sqrt{5-2}}{\sqrt{1-0,9454^2}} = 5,02. \tag{11}$$

Точність обчислення значень величин: r – чотири знаки після коми, $T_{СП}$ – два знаки після коми.

Під час перевірки значущості r область прийняття гіпотез двостороння, тобто одна половина області величиною $\alpha/2$ знаходиться зліва від математичного сподівання критерію T , друга половина – справа, де α – прийнятий рівень значущості.

Нульова гіпотеза підтверджується за умови $T_{СП} < T_{KP(\alpha;k)}$ і відхиляється при $T_{СП} \geq T_{KP(\alpha;k)}$. Число ступенів вільності для критерію Стюдента $k=n-2=5-2=3$. При $\alpha=0,01$ критичне значення критерія Стюдента $T_{KP}=5,84$. Отже, при $\alpha=0,05$ $T_{СП} = 5,02 < T_{KP(0,05;3)} = 5,84$, тобто нульова гіпотеза $H_0: r=0$ не відхиляється і емпіричне рівняння регресії не може вважатись лінійним.

Перевірка адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії значенням T_B і H_B інтервалу заглиблення закінченої свердловини за основною похибкою емпіричного рівняння лінійної регресії

Основна похибка апроксимації значень T_B і H_B емпіричним рівнянням лінійної регресії

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{C}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,073597}{5-1}} \approx 0,52. \tag{12}$$

За цим значенням основної похибки умова підтвердження емпіричного рівняння лінійної регресії $\sigma_0 \leq 0,1\overline{H}_B$ не виконується, бо $\sigma_0 = 0,52 > 0,1\overline{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$.

На рис. 3-5 наведено результати обчислень за програмою App.2 для перевірки умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ при вхідних даних прикладу, наведеного вище.

Початкова сторінка

Введіть кількість точок від 4 до 30

5

підтвердити !

Рис. 3. Вікно введення кількості експериментальних точок

Form_5

Введіть дані точок

1.x	0	1.y	0
2.x	1.6	2.y	1
3.x	10.1	3.y	2
4.x	26.74	4.y	3
5.x	17.25	5.y	4

обчислити

Рис. 4. Вікно введення вхідних даних ($y_i \equiv H_{B,i}$ і $x_i \equiv T_{B,i}$) прикладу перевірки трьох умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$

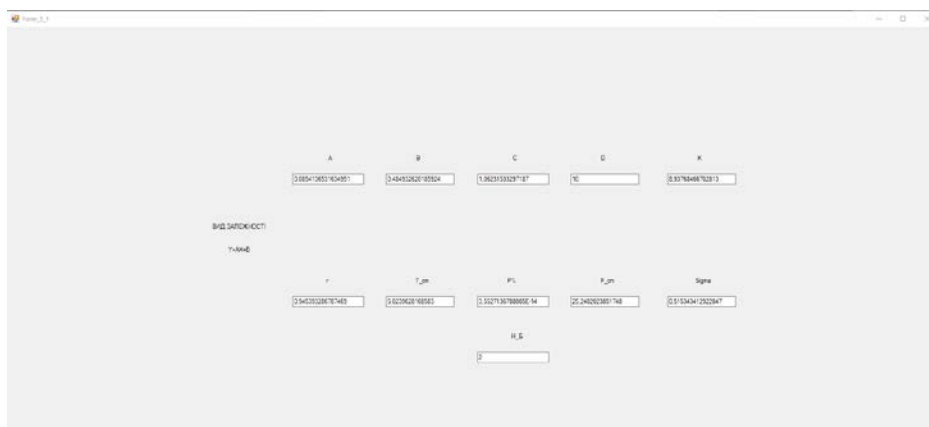


Рис. 5. Вікно з результатами перевірки умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за вхідними даними прикладу

Другий варіант вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки інтервалу 0...10 м починається з заглиблення 1 м. Результати перевірки трьох умов лінійності наведено в узагальненій табл. 9.

Таблиця 9. Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в геологічному інтервалі заглиблення 0...10 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{КР}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{КР}$ $\alpha=0,01$	$\bar{H}_B$	σ_0
0...4	0,08541	0,485	5	25,0	3	34,12	5,02	5,84	2,0	0,52
1...5	0,0849	0,2063	5	26,5	3	34,12	5,15	5,84	2,0	0,5
2...6	0,093	-0,3943	5	16,8	3	34,12	4,1	5,84	2,0	0,61
3...7	0,1940	0,2983	5	71,0	3	34,12	8,4	5,84	2,0	0,32
4...8	0,2058	-0,2928	5	31,9	3	34,12	5,6	5,84	2,0	0,46
5...9	0,3120	-0,3668	5	38,42	3	34,12	5,2	5,84	2,0	0,42
6...10	0,3598	0,2522	5	74,61	3	34,12	8,6	5,84	2,0	0,31

Значення $F_{СП}$, $T_{СП}$ і σ_0 , для яких умови лінійності не підтвержені, виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень $F_{КР}$ і $T_{КР}$.

Перший етап (варіант 2). Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за даними табл. 2

Алгоритм виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за табл. 2 повністю відповідає алгоритму виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за табл. 1 за одним винятком, максимальний об'єм вибірки складає 10 пар T_B і H_B , що відповідає максимальному десятиметровому інтервалу геологічних досліджень.

В цьому інтервалі можлива наявність одної або двох лінійних ділянок. При п'ятиметровому інтервалі можлива наявність тільки однієї лінійної ділянки.

Другий етап. Визначення статистичних характеристик вибірок дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння

В табл. 10 наведено рівняння регресії лінійних ділянок і середні значення механічної швидкості для цих ділянок за рівнянням регресії і за інтервалом заглиблення свердловини.

Таблиця 10. Рівняння регресії лінійних ділянок та середні значення механічної швидкості за рівнянням регресії і за інтервалом заглиблення свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	Інтервал заглиблення, м	Рівняння $H_B = A \cdot T_B + B$	$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м / год}$	
			За рівнянням	За заглибленням

До статистичних характеристик вибірок дискретних значень технологічних параметрів буріння відносять середнє арифметичне значення, виправлену вибірккову дисперсію, середнє квадратичне відхилення або стандарт, величину інтервалу для визначення артефактів (значення вибірки, які за величиною суттєво відрізняються від масиву всіх значень) і коефіцієнт варіації. В загальному випадку ці характеристики позначаються відповідно через $\bar{M}$, D , σ , Δ і R .

Для вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння їх визначають за наступними формулами:

$$\bar{V}_{\text{MEX}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{MEX},i}}{n}, \quad (13)$$

$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{\text{MEX},i} - \bar{V}_{\text{MEX}})^2}{n-1}, \quad (14)$$

$$\sigma_V = \sqrt{D_V}. \quad (15)$$

Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(\bar{V}_{\text{MEX}} - \Delta; \bar{V}_{\text{MEX}} + \Delta)$. Величина Δ визначається за формулою

$$\Delta = t_{\text{кр}} \cdot \sigma_V \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}}, \quad (16)$$

де $t_{\text{кр}}$ – критична точка розподілу Стюдента, визначена за прийнятим рівнем значущості α та числом ступенів вільності $\kappa=n-1$; n – об'єм сукупності значень $V_{\text{мех},i}$. Об'єм вибірки n при визначенні артефактів залежить від значення коефіцієнта варіації, який знаходимо за формулою

$$R_v = \frac{\sigma_v}{\bar{V}_{MEX}} \cdot 100\%. \quad (17)$$

При $R_v \leq 10\%$ мінливість значень у вибірці помірна і визначення артефактів не проводиться. При $10\% < R_v \leq 20\%$ мінливість значень у вибірці середня і визначення артефактів проводиться при $n \geq 10$. Якщо ж цей коефіцієнт знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$, то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки.

При визначенні артефактів рекомендовано приймати значення $\alpha = 0,1$. За артефакти для вибірки дискретних значень механічної швидкості виділеної лінійної ділянки можна приймати тільки початкове або кінцеве дискретне значення. Відхилення цих значень буде зменшувати інтервал заглиблення для цієї ділянки, що логічно і допустимо. Якщо артефакт знаходиться всередині ділянки, то його відхилення буде роз'єднувати вже виділену лінійну ділянку, що недопустимо. В цьому випадку необхідно перевірити наявність цього артефакта при менших значеннях рівня значущості, які можна приймати наступними 0,05; 0,02; 0,01; 0,002 і 0,001.

Статистичні характеристики вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і результати визначення артефактів рекомендується наводити в табл. 17 і 18.

Таблиця 11. Статистичні характеристики вибірок механічної швидкості виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення $\bar{V}_{MEX}$ за заглибленням свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX}$, м / год за загл.	$\bar{V}_{MEX}$, м / год	D_v , (м / год) ²	σ_v , м / год	R_v , %

Таблиця 12. Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX}$, n	σ_v	t_{kp} , α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta$, $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX}$, n'	D'_v	σ'_v	R_v , %

Прим: $\bar{V}'_{MEX}$, D'_v , σ'_v , n' – статистичні характеристики і об'єми вибірок механічної швидкості без артефактів. При відсутності артефактів $\bar{V}'_{MEX} \equiv \bar{V}_{MEX}$, $D'_v \equiv D_v$, $\sigma'_v \equiv \sigma_v$.

Режимні параметри буріння, до яких відносяться осьове навантаження на долото і частота його обертання, – це зовнішні незалежні чинники будь-яких експериментальних досліджень процесу руйнування породи і для вибірок їх дискретних значень визначення артефактів не проводиться, всі інші статистичні характеристики визначаються за формулами (13)-(15) і (17). Значення цих характеристик рекомендується наводити у відповідних таблицях.

Таблиця 13. Статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото $F_{\text{ДОЛ},i}, \text{mc}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n'	$\bar{V}'_{\text{MEX}}$	$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}, \text{mc}$	$D_F, (\text{mc})^2$	σ_F, mc	$R_F, \%$

Таблиця 14. Статистичні характеристики вибірок частоти обертання долота $n_{d,i}, \text{xc}^{-1}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n'	$\bar{V}'_{\text{MEX}}$	$\bar{n}_d, \text{xc}^{-1}$	$D_n, (\text{xc}^{-1})^2$	σ_n, xc^{-1}	$R_n, \%$

Статистичні характеристики обертового моменту ротора визначаються за формулами (13)-(17) і наводяться у відповідних таблицях.

Таблиця 15. Статистичні характеристики вибірок обертового моменту ротора $T_{P,i}, \text{кН} \cdot \text{м}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{\text{MEX}}$	$\bar{T}_P, \text{кН} \cdot \text{м}$ $T_{P.\text{MIN}} \dots T_{P.\text{MAX}}$	$D_T, (\text{кН} \cdot \text{м})^2$	$\sigma_T, \text{кН} \cdot \text{м}$	$R_T, \%$

Таблиця 16. Визначення артефактів для вибірок значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P, кН \cdot м$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	$t_{кр}, \alpha$	Δ	$\bar{T}_P - \Delta,$ $\bar{T}_P + \Delta$	$\bar{T}'_P, n'$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	σ'_T	$R_T, \%$

Визначення артефактів у вибірках дискретних значень $T_{P,i}$ проводиться за такими ж правилами, як і для вибірок $V_{MEX,i}$.

Третій етап. Перевірка параметричних нульових гіпотез про рівність вибірових дисперсій і середніх значень вибірок дискретних значень механічної швидкості, осьового навантаження на долото, частоти обертання долота і обертового моменту ротора для виділених лінійних ділянок в межах аналізованого інтервалу поглиблення свердловини

Цей етап виконується тільки для вибірок, значення яких розподіляються за нормальним законом. В якості наближеного критерію для узгодження з нормальним законом розподілу дискретних значень вибірок технологічних параметрів процесу буріння використовуються вибірові коефіцієнти асиметрії і ексцесу. Перевіряються умови $A < 3 \cdot \sigma_A$, $E < 3 \cdot \sigma_E$, де A – коефіцієнт асиметрії, σ_A – середнє квадратичне відхилення визначення асиметрії, E – ексцес, σ_E – середнє квадратичне відхилення визначення ексцесу. При виконанні цих умов підтверджується відповідність розподілу значень нормальному закону. Якщо ж одна з умов не виконується, то нормальний закон розподілу відхиляється і для цих вибірок перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться [6].

Визначення величин, які входять у наведені вище нерівності, показано на дискретних значеннях механічної швидкості буріння:

$$m_{1,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}}{n}, \quad (18)$$

$$m_{2,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^2}{n}, \quad (19)$$

$$m_{3,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^3}{n}, \quad (20)$$

$$m_{4,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^4}{n}. \quad (21)$$

В цих формулах n , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – об'єм і початкові моменти емпіричної вибірки значень $V_{MEX,i}$.

За початковими моментами стандарт σ_V визначається за формулою

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(m_{2,V} - m_{1,V}^2) \cdot n}{n-1}}. \quad (22)$$

Третій центральний момент M_3 , коефіцієнт асиметрії A_V , четвертий центральний момент M_4 , коефіцієнт ексцесу E_V , середнє квадратичне відхилення асиметрії $\sigma_{A,V}$ і середнє квадратичне відхилення ексцесу $\sigma_{E,V}$ визначаються за формулами:

$$M_3 = m_{3,V} - 3m_{1,V} \cdot m_{2,V} + 2m_{1,V}^3; \quad (24)$$

$$A_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{MEX,i} - \bar{V}_{MEX})^3}{\sigma_V^3 \cdot n}, \text{ або } \frac{M_3}{\sigma_V^3}; \quad (25)$$

$$M_4 = m_{4,V} - 4m_{1,V} \cdot m_{3,V} + 6m_{1,V}^2 \cdot m_{2,V} - 3m_{1,V}^4; \quad (26)$$

$$E_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{MEX,i} - \bar{V}_{MEX})^4}{\sigma_V^4 \cdot n} - 3, \text{ або } \frac{M_4}{\sigma_V^4} - 3; \quad (27)$$

$$\sigma_{A,V} = \sqrt{\frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (28)$$

$$\sigma_{E,V} = \sqrt{\frac{24n \cdot (n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (29)$$

Результати обчислень за формулами (18)-(29) рекомендується подавати у вигляді таблиці.

Таблиця 17. Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $V_{mex,i}$ нормальному закону (закону Гаусса)

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_V	$M_{3,V}$	$M_{4,V}$	$A_V, 3\sigma_{A,V}$	$E_V, 3\sigma_{E,V}$

Наступним пунктом третього етапу методики є перевірка статистичної нульової гіпотези $H_0: D(X) = D(Y)$ про рівність генеральних дис-

персій нормальних сукупностей X і Y . Проти нульової гіпотези висувається альтернативна (конкурентна) гіпотеза $H_A: D(X) \neq D(Y)$. Область прийняття рішення про підтвердження або відхилення нульової гіпотези двостороння. Умова підтвердження нульової гіпотези $F_{KP} > F_{СП}$, альтернативної – $F_{KP} \leq F_{СП}$. Статистичний спостережний (емпіричний) критерій $F_{СП}$ – це випадкова величина, значення якої визначають за дисперсіями вибірок $D_{X.j}$ і $D_{Y.k}$, які знайдені для нормальних генеральних сукупностей [8],

$$F_{СП} = \frac{D_{X.j}}{D_{Y.k}}, D_{X.j} > D_{Y.k}. \quad (30)$$

У (30) F_{KP} – це критичне значення статистичного критерію F за розподілом Фішера – Снедекора, яке вибирається залежно від прийнятого значення рівня значущості α (рекомендується приймати $\alpha=0.01$) і чисел ступенів вільності k_1 і k_2 , які визначаються за формулами

$$k_1 = n_X - 1; k_2 = n_Y - 1. \quad (31)$$

Якщо нульова гіпотеза про рівність генеральних дисперсій не відхиляється при прийнятому значенні α , то можна стверджувати, що вибірки відносяться до одної генеральної сукупності, якщо не відхиляється альтернативна гіпотеза – то до різних генеральних сукупностей.

Результати перевірки статистичної гіпотези про рівність генеральних дисперсій нормальних сукупностей технологічних параметрів за формулами (30) і (31) рекомендується подавати у вигляді табл. 18.

Таблиця 18. Перевірка нульових $D(X)_j = D(Y)_k$ та альтернативних $D(X)_j \neq D(Y)_k$ гіпотез при $\alpha=0,01$

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	Середні Значення вибірок	Дисперсії вибірок	n	$F_{СП}$	F_{KP}	Нульова гіпотеза $D_{X.j} = D_{Y.k}$
	$\bar{X}_j$	$D_{X.j}$				
	$\bar{Y}_k$	$D_{Y.k}$				

Остаточний висновок про належність вибірок дискретних значень технологічних параметрів до однієї генеральної сукупності можна зробити тільки після перевірки статистичних гіпотез про рівність середніх значень вибірок, для яких гіпотеза про рівність генеральних дисперсій не відхиляється.

Нульова статистична гіпотеза $H_0: M(X) = M(Y)$ про рівність математичних сподівань (генеральних середніх) двох нормальних сукупностей підтверджується при виконанні умови $T_{KP} > T_{СП}$. Альтернативна гіпотеза $H_A: M(X) \neq M(Y)$ приймається при виконанні умови

$T_{KP} \leq T_{СП}$. Статистичний спостережний (емпіричний) критерій $T_{СП}$ – це випадкова величина, значення якої визначають за середніми значеннями $\bar{x}_j$ і $\bar{y}_k$ порівнюваних вибірок об'єму n [8].

Якщо $n_{x,j} \leq 30$ і $n_{y,k} \leq 30$, то спостережне (емпіричне) значення статистичного критерію Стюдента визначається за формулою

$$T_{СП} = \frac{|\bar{x}_j - \bar{y}_k|}{\sqrt{(n_{x,j}-1) \cdot D_{x,j} + (n_{y,k}-1) \cdot D_{y,k}}} \sqrt{\frac{n_{x,j} \cdot n_{y,k} (n_{x,j} + n_{y,k} - 2)}{n_{x,j} + n_{y,k}}}. \quad (32)$$

У нерівностях T_{KP} – це критичне значення статистичного критерію T за розподілом Стюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості α (рекомендується приймати $\alpha=0,05$) і числа ступенів вільності k_3 ($k_3 = n_{x,j} + n_{y,k} - 2$).

Якщо $n_{x,j} > 30$ і $n_{y,k} > 30$, то спостережне (емпіричне) значення статистичного критерію Стюдента визначається за формулою

$$T_{СП} = \frac{|\bar{x}_j - \bar{y}_k|}{\sqrt{D_{x,j} / n_{x,j} + D_{y,k} / n_{y,k}}}. \quad (33)$$

При виконанні умови $T_{KP} > T_{СП}$ вибірки належать до однієї генеральної сукупності (ГС), тобто вони за своїми параметрами розподілу, дисперсією і середніми значеннями однакові, при $T_{KP} \leq T_{СП}$ – неоднакові. Іншими словами різниця між параметрами розподілу викликана не випадковою похибкою, а впливом інших факторів, які супроводжують цей фізичний процес.

Результати перевірки статистичної гіпотези про рівність математичних сподівань (генеральних середніх) двох нормальних сукупностей технологічних параметрів за формулами (32) і (33) рекомендується подавати у вигляді табл. 19.

Таблиця 19. Перевірка нульових $M(X)_j = M(Y)_k$ та альтернативних $M(X)_j \neq M(Y)_k$ гіпотез при $\alpha=0,05$

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	Середні Значення вибірок	Дисперсії вибірок	n	$F_{СП}$	F_{KP}	Нульова гіпотеза $M(X)_j = M(Y)_k$
	$\bar{x}_j$	$D_{x,j}$				
	$\bar{y}_k$	$D_{y,k}$				

За результатами перевірки закону розподілу і параметричних статистичних гіпотез про рівність дисперсій і середніх значень вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і параметрів режиму бу-

ріння виділяються всі лінійні ділянки, які належать до різних генеральних сукупностей.

В табл. 20 наводяться результати виділення однорідних лінійних ділянок, які належать до різних генеральних сукупностей, і відповідні цим ділянкам результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння.

Таблиця 20. Однорідні лінійні ділянки, які належать до різних ГС, і результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД) та інтервал заглиблення свердловини	п	$\bar{V}'_{MEH}$	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}, \text{тс}$	$\bar{T}_P, \text{кН} \cdot \text{м}$	$T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$

Висновки

1. Запропоновано методику обробки результатів зміни технологічних параметрів пробурених нафтових і газових свердловин, за якою визначення однорідних ділянок інтервалу заглиблення здійснюється за програмою App.2., розробленою в середовищі Visual Studio на мові програмування «C#» (Сі Шарп) за допомогою фреймворку «Windows Form Application», з використанням операційних систем Windows.

2. За цією методикою для однорідних за буримістю ділянок поглиблення визначається закон розподілу і статистичні характеристики для основних технологічних параметрів, до яких відносяться механічна швидкість буріння (критерій буримості), осьове статичне навантаження на долото, обертовий момент ротора установки, частоти обертання ротора і долота. Належність однорідних ділянок заглиблення свердловини до однієї генеральної сукупності визначається за результатами перевірки статистичних параметричних гіпотез для всіх наведених вище технологічних параметрів. При відхиленні хоча б однієї параметричної гіпотези про рівність дисперсій і середніх значень порівнюваних вибірок дискретних значень цих параметрів, гіпотеза про приналежність однорідних лінійних ділянок до інтервалу свердловини з однаковими фізико-механічними характеристиками гірської породи відхиляється.

3. Застосування запропонованої методики дозволяє оцінити ефективність використання нових технологій процесу руйнування гірської породи методом порівняння результатів їх впровадження в процес буріння в однорідних лінійних ділянок з однаковими літологічними характеристиками. Для цих ділянок статистичні характеристики вибірок

дискретних значень технологічних параметрів повинні належати до однієї генеральної сукупності.

Література

1. Симонянц Л.Е. Разрушение горных пород и рациональная характеристика двигателей для бурения. М.: Недра, 1966. – 227 с.
2. Симонов В.В., Вискребцов В.Г. Работа шарошечных долот и их усовершенствование. – М.: Недра, 1975. – 240 с.
3. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р. Автоматизований контроль меж пластів гірських порід в процесі буріння на нафту і газ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1998. – 204 с.
4. Борисевич Б.Д. Методика аналізу аналогових записів проходки на долото / Б.Д. Борисевич, М. В. Лисканич, Р. В. Василик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. – Вип.4 (Том 25). – С.151-159.
5. Стійкість і коливання бурильної колони / В.М.Мойсишин, Б.Д.Борисевич, Ю.Л.Гаврилів, С.А.Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.
6. Герасимович А.И., Матвеева Я.И. Математическая статистика. – Мн.: Вышэйш. школа, 1978. – 200 с.
7. Методика статистической обработки эмпирических данных. РТМ 44-62, 1966.
8. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.; Высш.школа, 1979 – 400 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 17.06.2025 р.

METHODOLOGY FOR PROCESSING THE RESULTS OF CHANGES IN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DRILLING COMPLETED OIL AND GAS WELLS

V. M. Moisyshyn, A. P. Ivasiutyn, V. V. Tyrlych

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

15, Karpatska Street, Ivano-Frankivsk, 76019;

tel. +380 (342) 71-72-31; e-mail: math@nung.edu.ua

Modern drilling rigs, such as the Ultra Single 150 drilling complex developed by the Canadian company Sense EDM, are equipped with control and measuring instruments. The monitors are located in the drilling master's control room. Their use allows for recording discrete values of all technological parameters of the drilling process with a sampling step of 1 m of well depth. These values are stored for completed oil and gas wells in the appropriate data bank on electronic media.

Fixing changes in drilling technological parameters allows for analyzing the impact of using modern technologies on the rock destruction process.

To conduct such an analysis, it is necessary to select homogeneous areas of well deepening according to the accepted drilling criterion, for example, according to the change in mechanical drilling speed.

The authors have developed a method for processing the results of changes in technological drilling parameters of completed wells. The program App.2 is proposed for determining homogeneous borehole sections of the well, which is developed in the Visual Studio software environment in the C# programming language (C Sharp) using the Windows Form Application framework using Windows operating systems.

The peculiarity of this method lies in the fact that for intervals of penetration that are homogeneous in terms of drillability, the consistency of the discrete sample values of key technological parameters with the normal distribution law is verified. These parameters include the mechanical drilling speed (drillability criterion), axial static load on the bit, the torque of the installation rotor, and the rotation speeds of the rotor and bit. Belonging homogeneous well-depth sections to one general population is determined by the testing results statistical parametric hypotheses for all the above technological parameters. If at least one parametric hypothesis about the equality of variances and mean values of the compared samples of discrete values of these parameters is rejected, the hypothesis about the belonging homogeneous linear sections to the well interval with the same physical and mechanical characteristics of the rock is rejected.

Keywords: *technological parameters of the rock fracture process, drillability criterion, statistical parametric hypotheses, well deepening, general population.*