

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Івасютин Андрій Петрович

УДК 622.243.6:622.245.1:531.38

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ШАРОШКОВИХ ДОЛІТ
НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КРУТНОГО МОМЕНТУ**

185 – Нафтогазова інженерія та технології

18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А. П. Івасютин

Науковий керівник: **Мойсишин Василь Михайлович,**
доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2026

АНОТАЦІЯ

Івасютин А. П. Підвищення ефективності роботи шарошкових доліт на основі експериментальних досліджень крутного моменту. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 – Нафтогазова інженерія та технології (18 – Виробництво та технології). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності роботи шарошкових доліт за результатами експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильної колони на крутний момент на долоті.

На основі обробки результатів стендових експериментальних досліджень запропоновано багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті та її складових, віднесених до низькочастотних та зубцевих коливань долота.

Запропоновано багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції для критеріїв оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті, а саме: коефіцієнтів динамічності (інтегрального і максимального) та подвійної амплітуди коливань крутного моменту.

Розроблено методику обробки дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння закінчених нафтових і газових свердловин, пробурених у промислових умовах.

Адаптовано результати експериментальних стендових досліджень до промислових даних буріння глибоких нафтових і газових свердловин із використанням методики обробки дискретних значень. Основні властивості частинних емпіричних залежностей критеріїв оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті одержані за стендовими і промисловими

дослідженнями однакові. Запропоновано конструкцію пристрою зміни крутильної жорсткості, на яку було видано патент України на корисну модель №152816.

Ключові слова: свердловина, гірська порода, буріння, бурильна колона, коливання, дискретизація, буровий верстат (стенд), крутний момент, шарошкове долото, буровий розчин, програмне забезпечення, планований експеримент, енергоємність процесу руйнування гірської породи, жорсткість і демпфування бурильного інструменту, критерії оцінки динамічності процесу

ABSTRACT

Ivasiutyn A. P. Improving the performance efficiency of roller cone bits based on experimental studies of torque. – Copyright of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 185 – Oil and Gas Engineering and Technology (18 – Production and Technology). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of roller cone bits based on the results of experimental studies of the influence of the rigidity and damping of the drilling string on bit torque.

Based on the analysis of bench experimental results, multifactorial empirical models of non-linear correlation between the total energy of the process of changing the torque on the drill bit and its components, and low-frequency and tooth vibrations of the drill bit, are proposed.

Multifactorial empirical models of non-linear correlation are proposed for assessing the dynamics of torque changes on the drill bit. These models consider the following criteria: integral and maximum coefficients, dynamics, and double amplitude of torque values.

A method was developed for processing the discrete values of the technological parameters of the drilling process for completed oil and gas wells drilled in industrial conditions.

The results of experimental bench tests have been adapted to industrial data on deep oil and gas well drilling using discrete value processing methods. The main properties of the partial empirical dependencies of the criteria for assessing the dynamics of the process of changing the torque on the bit, obtained from bench and industrial studies, are found to be identical. A design of a device for changing torsional stiffness has been proposed, and for which a utility model patent (UA No. 152816 U) has been issued.

Key words: well, rock, drilling, drill string, oscillations, discretization, drilling rig, torque, roller cone bit, drilling fluid (drill mud), software, planned experiment, energy intensity of rock destruction process, rigidity and damping of drilling tool, criteria for assessing process dynamics

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, В. Р. Процюк, І. І. Возний. Удосконалена методика обробки результатів факторного експерименту // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2022. – №17(64). – С. 75-95. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-75-95.
2. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, Л. В. Борисевич, О. М. Витвицька. Багатофакторні емпіричні моделі енергії низькочастотних та зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті // Металофізика та новітні технології. – 2023. №10(45). С. 1205-1235. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.10.1205>.
3. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**. Експериментальна оцінка енергії зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2024. – № 19(73). С. – 105-125. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19\(73\)-105-125](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19(73)-105-125).

4. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, В. В. Тирлич. Методика обробки результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2025. – № 20(76). С. – 114-137. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20\(76\)-114-137](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20(76)-114-137).
5. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**. Експериментальна оцінка подвійної амплітуди коливного процесу зміни обертового моменту на долоті // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2025. – 21(79). С. 179-206. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-21\(79\)-179-206](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-21(79)-179-206).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Удосконалена методика апроксимації даних планового експерименту частинними емпіричними залежностями / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Modern problems of science, education and society», 26-28.03.2023 р. – Київ: Науково-видавничий центр “Sci-conf.com.ua”, 2023. – С. 352-358. ISBN 978-966-8219-87-0.
2. Стендові експериментальні дослідження динамічного складника обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Scientific progress: innovations, achievements and prospects», 1-3.05.2023. – Munich, Germany. 2023. – С. 145-151. ISBN 978-3-954753-04-8.
3. Вплив параметрів режиму буріння і компоновання низу бурильної колони на інтенсивність процесу зміни обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Science and education: synergy of innovation», 26-28.01.2026. – Берлін, Німеччина. 2026.
4. Стендові експериментальні дослідження подвійної амплітуди динамічного складника обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Innovation and development in world science», 2-4.02.2026. – Цюрих, Швейцарія. 2026.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації*

1. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №115868. Комп'ютерна програма «Визначення емпіричних рівнянь регресії» (програма «App.1») / **А. П. Івасютин**, В. М. Мойсишин. Дата реєстрації 17.01.2023. Свідоцтво №115868 від 17.01.2023 року. Електронний ідентифікатор CR0043170123 <https://sis.ukrpatent.org>.
2. Патент на корисну модель № 152816 Україна, МПК E21B 17/02 (2006.01). Амортизатор крутильних коливань / В. М. Мойсишин, Б. Д. Борисевич, **А. П. Івасютин**. – № и 2022 03751; заявл. 07.10.2022; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ ТА КОМПОНУВАННЯ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ НА КРУТНИЙ МОМЕНТ НА ДОЛОТІ.....	11
1.1 Огляд теоретичних досліджень величини крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини.....	11
1.2 Огляд стендових і промислових досліджень величини крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини.....	14
1.3 Огляд стендових та промислових досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини.....	29
Висновки до розділу 1.....	40
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	42
2.1 Підбір апроксимуючих (згладжуючих) емпіричних рівнянь регресії за програмою App.1. Визначення емпіричного значення коефіцієнта кореляції...42	
2.2 Методика створення багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції.....	50
2.3 Методика обробки результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин	56
Висновки до розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3 БАГАТОФАКТОРНІ ЕМПІРИЧНІ МОДЕЛІ МНОЖИННОЇ НЕЛІНІЙНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ.....	74
3.1 Багатофакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції загальної дисперсії $D_T(E_T)$ процесу зміни крутного моменту на долоті вигляду $E_T = B_{cp} \cdot f(n) \cdot f(F_{ct}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$	76

3.2 Багатофакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції енергії низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту на долоті вигляду $E_{HЧК} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$	93

3.2.1 Емпірична модель енергії (дисперсії) низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 1440 МПа.....	95

3.2.2 Емпірична модель енергії (дисперсії) низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 2050 МПа	99

3.3 Багатофакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції енергії зубцевих коливань $E_{ЗК}$ процесу зміни крутного моменту на долоті вигляду $E_{ЗК} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$	107

3.3.1 Емпірична модель енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{ЗК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 1440 МПа.....	109

3.3.2 Емпірична модель енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{ЗК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 2050 МПа.....	113

Висновки до розділу 3	122

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ І КОМПОНУВАННЯ БУРИЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗМІНИ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ	124

4.1 Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції інтегрального коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті	125

4.1.1 Емпірична модель коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту $K_{дин.ин}$ для породи твердістю 1440 МПа	125

4.1.2 Емпірична модель коефіцієнту оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту $K_{дин.ин}$ для породи твердістю 2050 МПа	131

4.2 Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції максимального коефіцієнта динамічності $k_{T.\partial.\max}$ процесу зміни крутного моменту на долоті.....	141

4.2.1 Емпірична модель максимального коефіцієнта динамічності процесу зміни крутного моменту $k_{T.\partial.\max}$ для породи твердістю 1440 МПа	142

4.2.2 Емпірична модель максимального коефіцієнта динамічності процесу зміни крутного моменту $k_{T.\partial.\max}$ для породи твердістю 2050 МПа	146

4.3 Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції подвійної амплітуди $2A_T$ процесу зміни крутного моменту на долоті.....	154

4.3.1 Емпірична модель подвійної амплітуди процесу зміни крутного моменту $2A_T$ для породи твердістю 1440 МПа.....	154

4.3.2 Емпірична модель подвійної амплітуди процесу зміни крутного моменту $2A_T$ для породи твердістю 2050 МПа.....	159

Висновки до розділу 4.....	169

РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ЗАКІНЧЕНИХ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН І РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ КОМПОНУВАННЯ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ.....	175

5.1 Встановлення залежностей між параметрами режиму буріння та механічною швидкістю буріння і крутним моментом на долоті за даними пробурених свердловин	175

5.2 Адаптація критеріїв оцінки інтенсивності динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті, одержаних методом планованого факторного експерименту, до промислових умов.....	184

5.3 Встановлення залежностей між параметрами режиму буріння, критеріями оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за даними пробурених свердловин.....	191

5.4 Розробка пристроїв зміни крутильної жорсткості і коефіцієнта демпфування компонування низу бурильної колони при бурінні у промислових умовах	198
Висновки до розділу 5	206
ВИСНОВКИ	210
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	213
ДОДАТКИ	219

ВСТУП

Актуальність проблеми.

Енергетична стратегія України передбачає розширення об'ємів буріння та зменшення термінів будівництва свердловин. Процес буріння є найбільш енергозатратним зі всього циклу будівництва свердловини.

Величина енергії, яка підводиться до шарошкового долота під час роторного буріння, складає 12 – 15 % від загальної енергії, використаної на поглиблення свердловини. Вивчення закономірностей перерозподілу енергії процесу зміни крутного моменту на долоті при включенні в компонування низу бурильної колони пристроїв, які змінюють її жорсткість та коефіцієнт демпфування, дає можливість зменшити енергоємність процесу руйнування гірської породи на вибої, тобто підвищити ефективність процесу буріння з одночасним зниженням енергозатрат на будівництво свердловин.

За цим раціональне використання закономірностей розподілу енергії процесу зміни крутного моменту на долоті є актуальною проблемою зі створення нових ефективних технологій буріння свердловин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає науковим напрямкам діяльності нафтогазового комплексу України та відноситься до галузевої проблеми і тематичних планів групи компаній НАК «Нафтогаз України», спрямована на виконання основних показників «Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» згідно розпорядження КМУ №373-р від 21.04.2023 року.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності роботи шарошкових доліт на основі результатів експериментальних досліджень впливу жорсткості та демпфування бурильного інструменту на процес зміни крутного моменту на долоті.

Основні задачі дослідження:

1. Аналіз досліджень впливу параметрів буріння та компонування низу бурової колони на процес зміни крутного моменту на долоті.

2. Удосконалення методики створення емпіричної багатофакторної моделі множинної нелінійної кореляції за даними, одержаними методом раціонального планування експерименту, за яким емпіричні частинні залежності між вихідним параметром Y та всіма вхідними змінними незалежними чинниками підбираються комп'ютерною програмою апроксимації експериментальних даних, адаптованою до операційних систем Windows.

3. За результатами стендових експериментальних досліджень одержати багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті та її складових, віднесених до низькочастотних та зубцевих коливань долота.

4. За результатами стендових експериментальних досліджень одержати багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції для критеріїв оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті.

5. Розробка методики обробки дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння закінчених свердловин, пробурених у промислових умовах. Застосування цієї методики до адаптації результатів стендових експериментальних досліджень та промислових умов буріння свердловин шарошковими долотами.

6. За аналізом результатів стендових експериментальних досліджень розробити пристрій зміни крутильної жорсткості для компонування низу бурильної колони.

Об'єкт дослідження – процес поглиблення свердловини шарошковими долотами на стенді з урахуванням жорсткості та демпфування наддолотних пристроїв.

Предмет дослідження – вплив жорсткості та демпфування бурильного інструменту на зміну крутного моменту на долоті.

Методи досліджень. Експериментальні стендові дослідження впливу режимних параметрів і параметрів бурильної колони на крутний момент на долоті (проведені за теорією планування експериментів). Аналіз результатів досліджень за методикою створення емпіричної багатофакторної моделі множинної нелінійної кореляції з використанням методів математичної статистики і спектрального аналізу, що забезпечило визначення статистичних

характеристик вибірок, перевірки статистичних гіпотез, апроксимацію експериментальних даних емпіричними залежностями, визначення автокореляційної функції та спектральної щільності випадкової стаціонарної функції.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено методику створення емпіричної багатофакторної моделі множинної нелінійної кореляції за даними, одержаними методом раціонального планування експерименту з використанням комп'ютерної програми апроксимації експериментальних даних, адаптовану до операційних систем Windows, на яку видано свідоцтво авторського права на твір №115868.

2. Вперше отримано моделі нелінійної кореляції загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті, та її складових, віднесених до низькочастотних та зубцевих коливань долота.

3. Вперше отримано моделі нелінійної кореляції процесу зміни крутного моменту на долоті для інтегрального та максимального коефіцієнтів динамічності та подвійної амплітуди коливань значень крутного моменту на долоті.

4. Вперше розроблено методику обробки дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння закінчених нафтових і газових свердловин, пробурених у промислових умовах.

Основні положення, що захищаються.

1. Залежності зміни крутного моменту на шарошковому долоті від жорсткості та демпфування компонування низу бурильної колони, що описуються багатофакторними нелінійними моделями загальної енергії процесу та її низькочастотних та зубцевих складових.

2. Багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції для інтегрального і максимального коефіцієнтів динамічності та подвійної амплітуди крутного моменту на долоті.

3. Методика обробки дискретних значень технологічних параметрів нафтових і газових свердловин, пробурених у промислових умовах.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено методику вибору жорсткості компонування низу бурильної колони для зменшення енергоємності процесу буріння.
2. Розроблено та рекомендовано до впровадження експрес-метод моніторингу зміни крутного моменту на долоті за подвійною амплітудою коливань.
3. Розроблено конструкцію амортизатора крутильних коливань бурильної колони (патент України на корисну модель №152816).

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались на:

- I міжнародній науково-практичній конференції “Modern problems of science, education and society” (26-28.03.2023р. Київ, Україна);
- VIII міжнародній науково-практичній конференції “Scientific progress: innovations, achievements and prospects” (01-03.05.2023р. Мюнхен, Німеччина);
- VI Міжнародній науково-практичній конференції “Science and education: synergy of innovation” (26-28.01.2026 р. Берлін, Німеччина);
- IV Міжнародній науково-практичній конференції “Innovation and development in world science” (02-04.02.2026 р. Цюрих, Швейцарія);
- наукових семінарах кафедри буріння нафтових та газових свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти газу (м. Івано-Франківськ, 2022 – 2026 р.р.)

Публікації. За результатами досліджень, що викладені в дисертації, опубліковано в 11 наукових працях, з них 5 статей у фахових виданнях (в т.ч. одна стаття у виданні, що індексується у базі даних Scopus), тези чотирьох доповідей на конференціях у 2023 р. і 2026 р., свідоцтво авторського права на твір №115868 і патент України на корисну модель №152816.

Автор висловлює щире подяку науковому керівнику, д.т.н., професору Мойсишину В.М. за надані первинні матеріали стендових експериментальних досліджень (записи крутного моменту на долоті), одержані на буровому стенді ІФНТУНГ.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 69 найменувань на 6 сторінках, а також 7 додатків на 218 сторінках. Робота містить 76 рисунків та 137 таблиць. Основний зміст дисертації викладено на 218 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 436 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ ТА КОМПОНУВАННЯ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ НА КРУТНИЙ МОМЕНТ НА ДОЛОТІ

1.1 Огляд теоретичних досліджень величини крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини

В процесі поглиблення свердловини одним із основних параметрів процесу буріння гірської породи є крутний момент на долоті. Величина моменту повинна бути такою, щоб забезпечити обертання бурильного інструменту з одночасним подоланням опору породи при її руйнуванні долотами різних типів з використанням різних типів бурових розчинів. Крутний момент є одним із параметрів, за якими визначається енергоємність процесу руйнування породи [1]. Якщо встановити закономірності впливу крутного моменту на енергоємність, то можна оптимізувати час будівництва свердловини. Така оптимізація буріння може зменшити енергозатратність будівництва свердловини і, як наслідок, економію витрат на буріння свердловини.

На основі теоретичних досліджень В. С. Федоров [27, 28] запропонував визначати момент на долоті при турбінному бурінні за формулою

$$\bar{T}_d = \frac{1}{\eta}(T_p + T_h + 2T_T) + T_O, \quad (1.1)$$

де η – к.к.д. опори; T_p – момент, який витрачається на руйнування породи при перекичуванні шарошок по вибою; T_h – момент, який витрачається на вертикальне переміщення долота при перекичуванні шарошок по поверхні вибою; T_T – момент, який витрачається на подолання сил тертя між нерівною поверхнею вибою і зубцями шарошок; T_O – момент, який витрачається на тертя між стінкою свердловини і долотом при холостому обертанні долота. Моменти T_p , T_h і T_T знаходять за формулами

$$T_p = 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot F_{oc} \cdot \sqrt{\eta_z \cdot D \cdot \delta_t}, \quad (1.2)$$

де η_z – коефіцієнт перекриття зубців долота; δ_t – величина заглиблення зубців у породу, мм; F_{oc} – статичне осьове навантаження на долото, Н; D – діаметр долота, мм;

$$T_h = 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot F_{OC} \cdot m \cdot z \left(d_{uu} - \frac{2}{3} \delta_t \right) \sin \frac{2\pi}{2mz}, \quad (1.3)$$

де m – коефіцієнт, який залежить від розміщення зубців на шарошці; d_{uu} – діаметр шарошки, мм; z – число зубців на вінці діаметром d_{uu} ;

$$T_{T.T} = 1,28 \cdot 10^{-5} \cdot \mu \cdot \eta_z \cdot D \cdot K_Z \cdot F_{OC}, \quad (1.4)$$

де μ – коефіцієнт тертя між зубцями долота і нерівною поверхнею вибою свердловини; K_Z – коефіцієнт проковзування шарошок.

Теоретичними дослідженнями процесу зміни моменту займались також і інші вчені-нафтовики. Залежності, запропоновані цими дослідниками, наведені в [1].

За Г. І. Булахом

$$\bar{T}_D = K_1 \cdot R_{CP} \cdot F_{OC} + K_2 \cdot R_{CP} \cdot \frac{t_{cp}}{r_{cp}} \cdot F_{OC}, \quad (1.5)$$

де K_1 – коефіцієнт, який залежить від фізико-механічних властивостей породи, і характеризує глибину заглиблення зубців у породу; R_{CP} – середній радіус долота, м; K_2 – коефіцієнт, який залежить від конструкції долота і його озброєння та враховує ковзання зубців під час буріння; t_{cp} – середня величина кроку зубців долота, м; r_{cp} – середній радіус шарошки, м.

За Г. М. Гевіняном потужність буріння тришарошковим долотом становить

$$N_D = \alpha \cdot \beta \cdot (K_0 - A / n) n^{0.5} \cdot F_{OC}, \quad (1.6)$$

де α , β , K_0 , A – коефіцієнти, які залежать від ступеня очистки свердловини, діаметра долота, фізико-механічних властивостей породи та частоти обертання долота.

У формулах Г. І. Булаха та Г. М. Гевіняна не враховано величину моменту T_0 , яка витрачається на сили тертя.

За Л. Е. Симонянцем моментоемність визначають за формулою:

$$\bar{T}_D = c_1 + c_2 \cdot F_{CT} + c_3 \cdot n^2, \quad (1.7)$$

де c_1 , c_2 , c_3 – деякі сталі.

Для практичних розрахунків виразом $c_3 \cdot n^2$ можна знехтувати, тоді

$$\bar{T}_D = c_1 + c_2 \cdot F_{CT}. \quad (1.8)$$

Для ряду розрахунків, використавши питомий момент T_{II} , тоді формулу (1.5) можна подати у вигляді

$$\bar{T}_D = T_{II} \cdot F_{CT}. \quad (1.9)$$

Р. А. Ганджумян пропонує при турбінному бурінні визначати середнє значення крутного моменту за формулою:

$$\bar{T}_D = \kappa_t (T_0 + T_{II} \cdot F_{CT}), \quad (1.10)$$

де κ_t – коефіцієнт, який враховує момент, що йде на подолання сил тертя в підшипниках турбобура, інтервал його зміни 1,1–1,2.

За Е. Алліквандером за повного очищення вибою можна записати

$$\bar{T}_D \approx F_{CT}^{1,5}. \quad (1.11)$$

За умови незадовільного очищення поверхні вибою свердловини (повторне руйнування об'єму зруйнованої породи) умова (1.8) набуває вигляду

$$\bar{T}_D \approx F_{CT}^2. \quad (1.12)$$

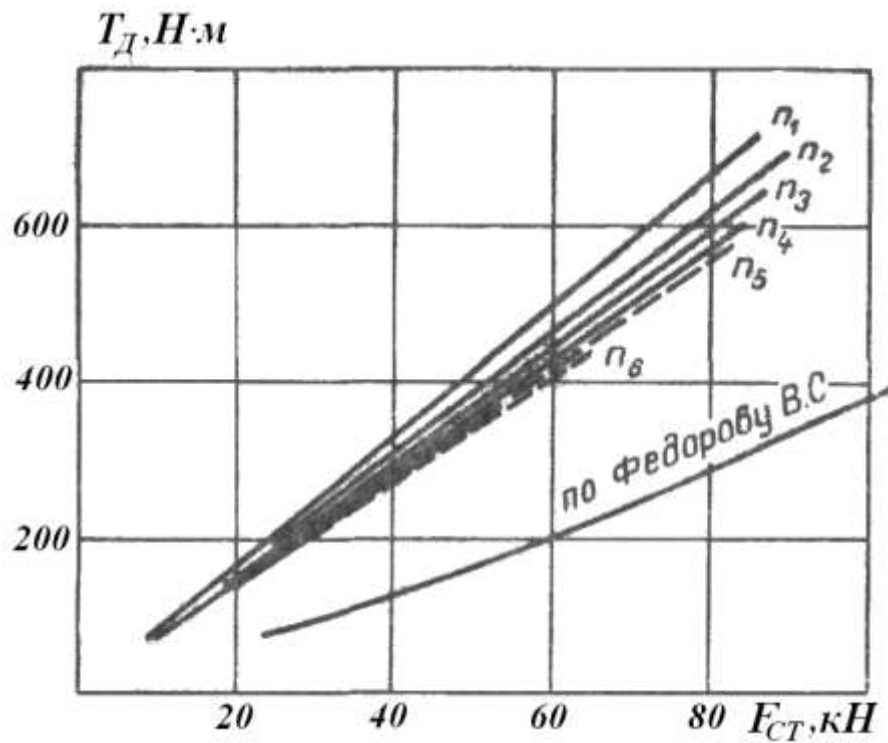
Незважаючи на великий об'єм аналітичних залежностей між моментом і режимними параметрами буріння, значення $\bar{T}_D$ є специфічним для кожної свердловини і визначається під час буріння гірської породи для конкретного бурового обладнання, типу бурового розчину та геологічних умов.

Другим недоліком наведених вище залежностей є відсутність оцінки впливу на величину моменту параметрів компонування низу бурильної колони (КНБК), тобто жорсткості і коефіцієнта демпфування.

Вибір значення моменту та оцінки впливу на його зазначених вище параметрів, найкраще проводити за результатами стендових і промислових досліджень.

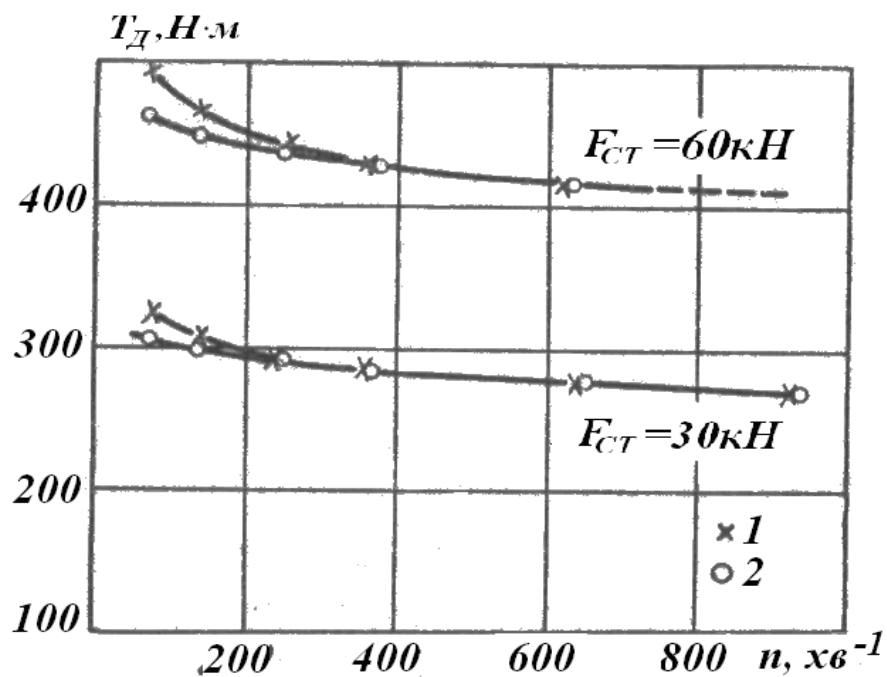
1.2 Огляд стендових і промислових досліджень величини крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини

На процес взаємодії долота з вибоєм впливає багато чинників, зокрема конструкція КНБК, властивості бурового розчину, пластовий тиск і т. ін., які важко врахувати під час опрацювання результатів досліджень. Найефективніше таку оцінку можна провести за результатами стендових і промислових досліджень. Перші промислові дослідження крутного моменту при турбінному бурінні шарошковими долотами, з використанням турботахометрів, були проведені Л. І. Штурманом [29] і Г. І. Булахом [30], а при бурінні електробурами – Ф. Н. Фоменком [31]. Значення моменту на долоті, одержані при цих дослідженнях значно відрізняються від значень моменту, обчислених за формулою (1.1). За формулою (1.1) розрахункове значення моменту 1000–1150 Н·м, а за промисловими даними величина моменту 1500–3500 Н·м, тобто методика визначення моменту за В. С. Федоровим не враховує ряд суттєвих факторів, а в першу чергу вплив механічних властивостей гірських порід, типу і діаметра долота, на величину моменту. Великий об'єм стендових досліджень процесу руйнування гірських порід під час буріння шарошковими долотами малого діаметра був проведений Ю. Ф. Потаповим і В. В. Сімоновим [32]. На рис. 1.1 зображено залежності крутного моменту від осьового навантаження під час буріння долотом В-140С за результатами цих стендових досліджень. Згідно рис. 1.1 значення теоретичної залежності $\bar{T}_d = f(F_{oc})$, обчислені за методикою В. С. Федорова, в 2,5 рази менші значень, одержаних експериментально, що підтверджує результати промислових досліджень, результати яких наведено вище. За рис. 1.1 залежності $\bar{T}_d = f(F_{oc})$ – це прямі лінії, які проходять через початок координат. Це свідчить про незначний вплив моменту T_0 , який витрачається на силу тертя між стінкою свердловини і долотом при холостому обертанні долота, на моментоемність поглиблення свердловини. Така лінійна залежність спостерігається тільки під час буріння в м'яких породах. Зі збільшенням твердості породи залежність $\bar{T}_d = f(F_{oc})$ перетворюється на нелінійну.



$n_1=69 \text{ хв}^{-1}$; $n_2=132 \text{ хв}^{-1}$; $n_3=245 \text{ хв}^{-1}$; $n_4=350 \text{ хв}^{-1}$; $n_5=640 \text{ хв}^{-1}$; $n_6=940 \text{ хв}^{-1}$

Рисунок 1.1 – Залежність крутного моменту на долоті від осьового статичного навантаження

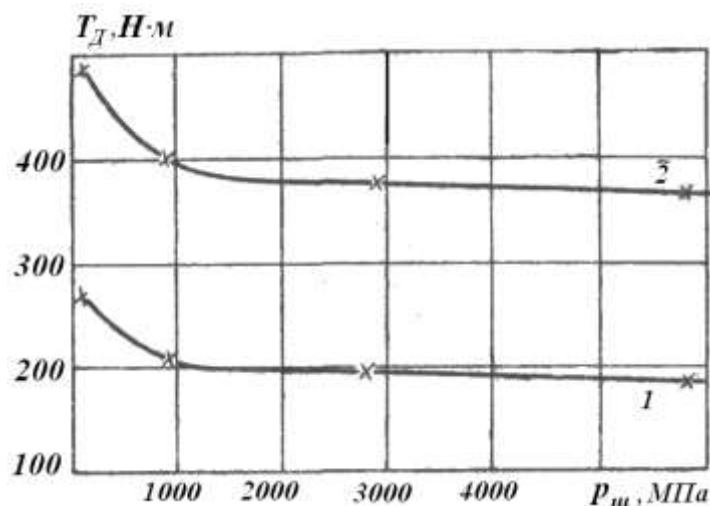


1 – долото В-140 С; 2 – долото В-140 Т

Рисунок 1.2 – Залежності крутного моменту від частоти обертання при бурінні в мармурі 950 МПа

За рис. 1.1 можна стверджувати, що на величину моменту впливає і частота обертання долота із збільшенням якої величина моменту зменшується. Результати більш детального аналізу частоти обертання на момент наведено на рис. 1.2 і 1.3. Зі збільшенням n_d величина $\bar{T}_d$ зменшується, що свідчить про зменшення величини заглиблення зубців шарошок в породу, яке пояснюється зменшенням часу їх контакту з вибоєм свердловини. За рис. 2 в інтервалі частоти обертання 69-245 хв^{-1} на величину моменту впливає крок зубців шарошок. Для долота В-140 С з більшим кроком зубців значення моменту величина моменту є більшою ніж для долота В-140 Т, крок зубців для якого є меншим.

На рис. 1.3 зображено залежності крутного моменту $\bar{T}_d$ від твердості гірської породи (вапняк, мрамур, граніт, кварцит), одержані при бурінні долотом В-97 К при частоті обертання $n=69\text{хв}^{-1}$.



1 – $F_{OC}=30$ кН; 2 – $F_{OC}=50$ кН

Рисунок 1.3 – Залежність крутного моменту на долоті від твердості гірської породи

Як бачимо, значний ріст крутного моменту спостерігається при бурінні в м'яких породах (1-4 категорія за твердістю за штампом, $p_u \leq 1000$ МПа).

При бурінні в середніх і твердих породах ($p_u = 2800$ МПа – 7-ма категорія і $p_u = 5830$ МПа – 10-та категорія) вплив твердості породи на крутний момент на долоті незначний.

Нелінійну залежність $\bar{T}_D = f(F_{CT})$, одержану під час буріння у твердих породах, можна подати параболою другого порядку [33, 34]

$$T = A_0 + A_1 \cdot F_{CT} + A_2 \cdot F_{CT}^2, \quad (1.13)$$

де A_0, A_1, A_2 – емпіричні коефіцієнти, які визначають за результатами стендових або промислових досліджень.

Згідно з [33] залежність $\bar{T}_D = f(F_{CT})$ можна подати лінійним рівнянням вигляду

$$T_D = C_0 + a_1 \cdot F_{CT}, \quad (1.14)$$

де C_0 і a_1 – емпіричні коефіцієнти.

Вводячи заглиблення свердловини за один оберт δ_0 , цю залежність можна подати так

$$T_D = C_{0\delta_0} + a_{1\delta_0} \cdot \delta_0, \quad (1.15)$$

де $C_{0\delta_0}$ і $a_{1\delta_0}$ – емпіричні коефіцієнти;

За постійного значення δ_0 момент $\bar{T}_D$ збільшується при зростанні частоти обертання в діапазоні 60-940 хв⁻¹. За постійного значення F_{CT} момент зменшується в інтервалі частоти обертання 60-350 хв⁻¹, при подальшому збільшенні частоти величина моменту практично не змінюється. У роботі [35, 62, 64] наведено результати промислових досліджень моментоемності буріння шарошковими долотами. Фіксацію моменту здійснювали глибинними реєстраторами. Залежності $\bar{T}_D = f(F_{CT})$ зображено на рис. 1.4 та 1.5.

Експериментальні залежності $\bar{T}_D = f(F_{CT})$ нелінійні й апроксимуються поліномом другого степеня

$$T = A_0 + A_1 \cdot F_{CT} + A_2 \cdot F_{CT}^2. \quad (1.16)$$

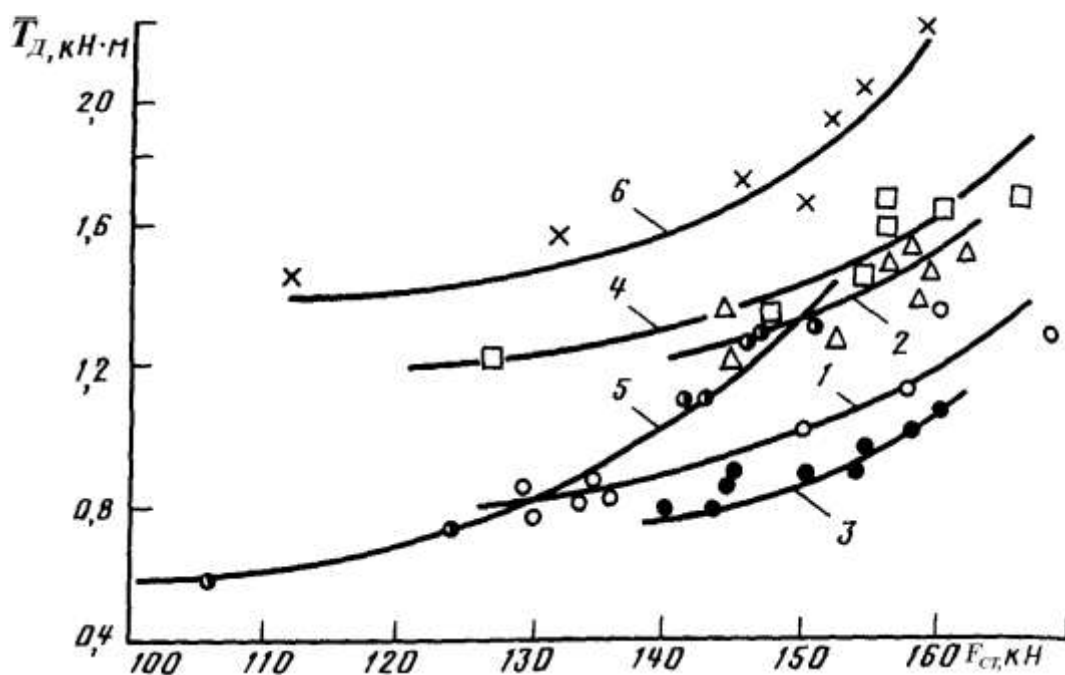


Рисунок 1.4 – Експериментальні залежності $\bar{T}_d = f(F_{ct})$, одержані під час буріння долотом К9 ТКЗ (1-4) та долотом 259Т (5-6)

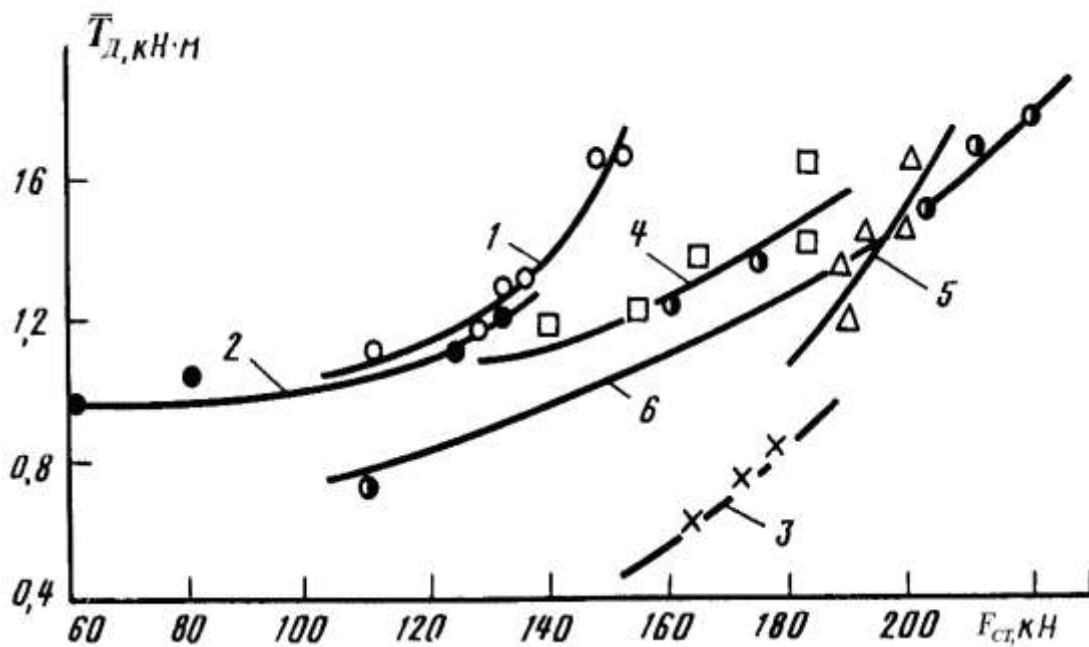


Рисунок 1.5 – Експериментальні залежності $\bar{T}_d = f(F_{ct})$ під час буріння долотом В190Т

У цій же роботі також наведено результати визначення моментоемності буріння долотами 2К-214ТКЗ з використанням у КНБК наддолотного амортизатора 2АН-195. За однакових умов буріння, використання амортизатора зменшує моментоемність буріння в 1,4 раза. У роботі [36,57] за результатами промислових випробувань тришарошкових доліт діаметрами 120-450 мм під час розбурювання пісковиків, вапняків та сірого граніту запропоновано таку формулу для визначення потужності P_D на долоті

$$P_D = C \cdot n \cdot D^{0,4} \cdot F_{CT}^{1,3},$$

де C – коефіцієнт, який враховує твердість гірської породи за штампом. Значення C для твердих порід – 3,71. Для зношених на 50% доліт одержано такі значення C : 7,8 – для м'яких; 6,95 – для середніх і 5,56 – для твердих порід.

Відношення P_D для м'яких, середніх і твердих порід становило – 1,4:1,35:1.

За результатами стендових досліджень, проведених О. Б. Трушкіним [37], одержані експериментальні залежності $T_{II} = f(F_{CT})$ при бурінні шарошковими долотами (рис. 1.6). Враховуючи наявність локальних максимумів та мінімумів на графіках, зміну експериментальних значень питомого моменту можна задовільно апроксимувати поліномами другого або третього степеня. Загальною ознакою всіх цих залежностей є ріст питомого крутного моменту при збільшенні осьового навантаження на долото. Характерні перегини експериментальних залежностей $T_{II} = f(F_{CT})$ задовільно узгоджуються із стрибками зміни енергоемності W_{II} за залежностями $W_{II} = f(F_{CT})$, наведеними на рис. 1.91 [1]. На рис. 1.7 наведені дзеркальні відображення залежності $T_{II} = f(F_{CT})$ для долота П215,9С-ГВ та залежність $W_{II} = f(F_{CT})$ для цього ж долота за рис. 1.91 [1]. Локальні максимуми, відносно осі F , графіка $T_{II} = f(F_{CT})$ відповідають локальним мінімумам графіка $W_{II} = f(F_{CT})$. Для першого стрибка зміни енергоемності ця відповідність практично складає 100%.

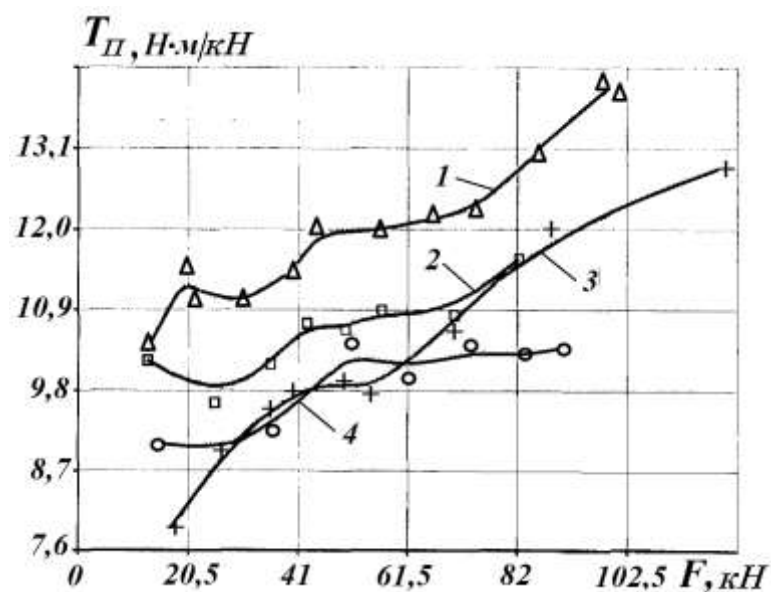
Деяка розбіжність між змінами моменту та енергоемності для наступних стрибків пояснюється більш плавною зміною моменту в порівнянні із зміною енергоемності при

збільшенні осьового навантаження, але тенденція до відповідності між локальними максимумами моменту та мінімумами енергоємності зберігається.

За сказаним вище можна за емпіричним рівнянням регресії залежностей $T_{\Pi} = f(F_{CT})$ прогнозувати стрибки руйнування породи за залежностями $W_{\Pi} = f(F_{CT})$.

В [37] вперше представлені залежності $\bar{T}_D = f(F_{CT})$ і $T_{\Pi} = f(F_{CT})$ для лопатевих доліт типу РСА (ріжуче-сколюючого типу).

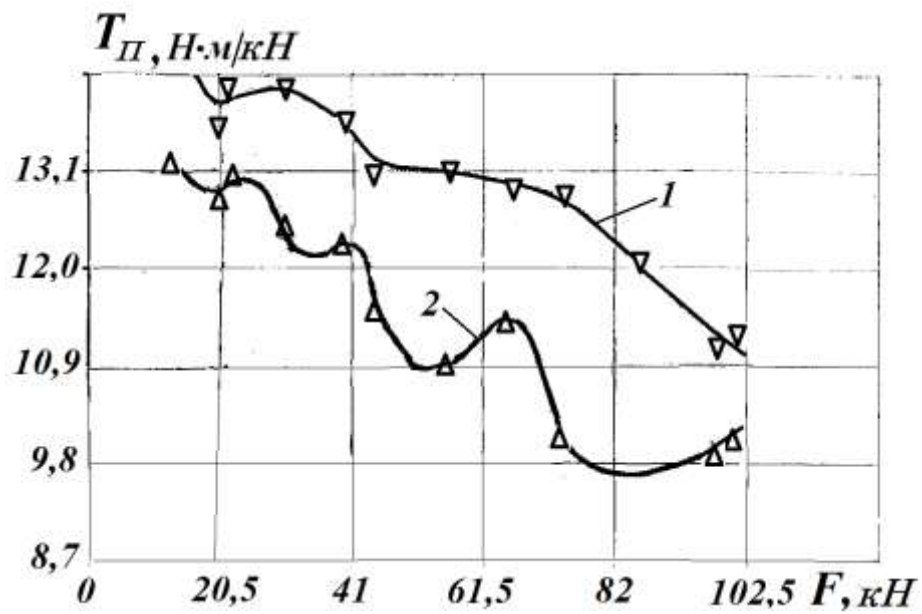
Загальною ознакою наведених, на рис. 1.6 і 1.8 залежностей $\bar{T}_D = f(F_{CT})$ і $T_{\Pi} = f(F_{CT})$, є ріст питомого моменту та моментоемності при збільшенні осьового навантаження на долото. Типорозмір долота не впливає на цю ознаку. Другим важливим висновком цих стендових досліджень є встановлення відповідності локальних максимумів моменту локальним мінімумам енергоємності.



1(Δ) – долото Ш215,9С-ГВ; 2(□) – Ш190,5СЗ-ГВ;

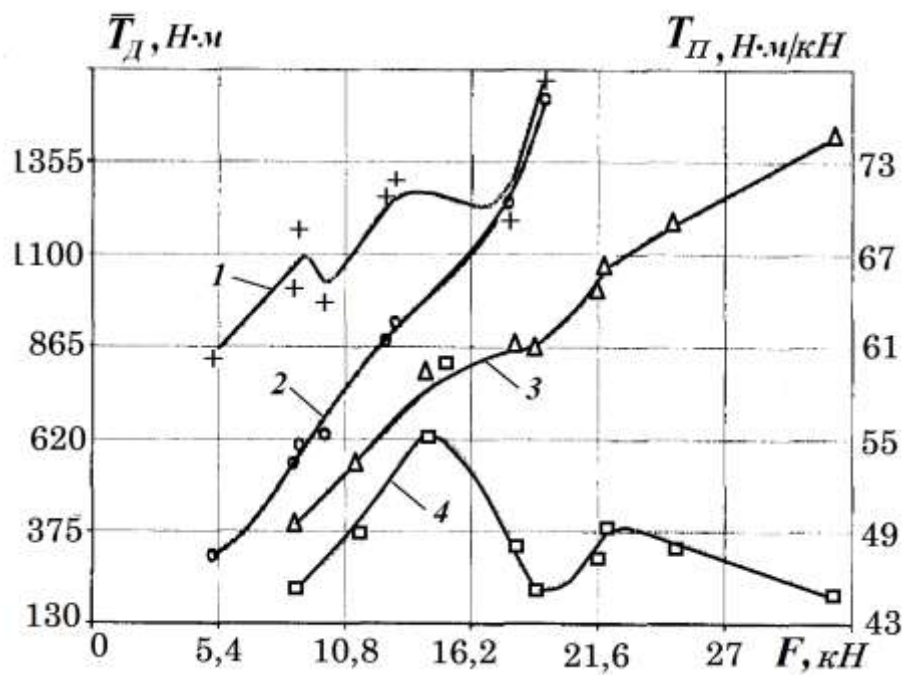
3(+)- Ш190,5СЗ-ГАУ R27; 4(○) – Ш190,5С-ГВ;

Рисунок 1.6 – Графіки залежностей $T_{\Pi} = f(F_{CT})$ для різних типорозмірів шарошkových доліт



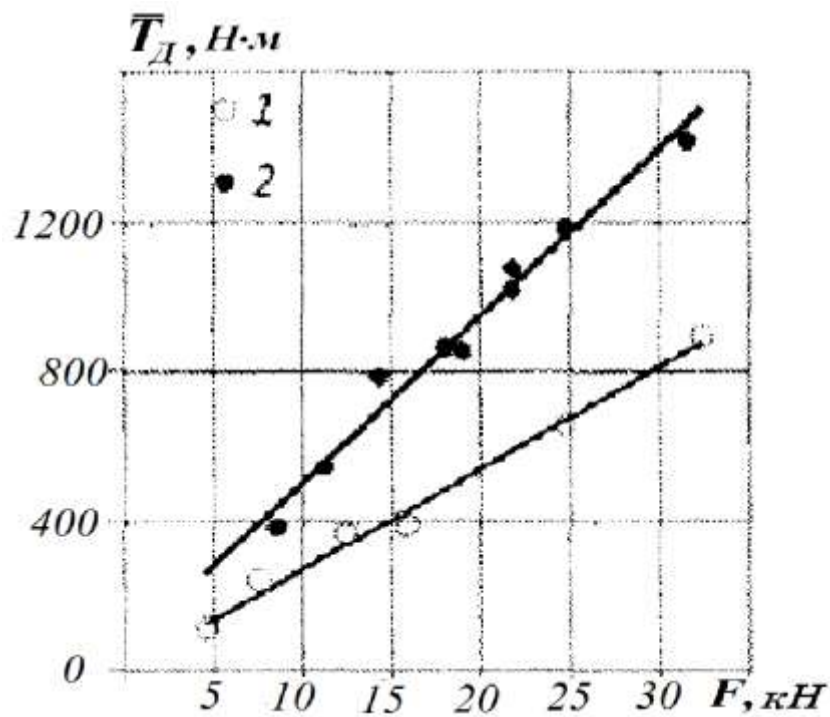
1(∇) – дзеркальне відображення залежності $T_{II} = f(F_{CT})$; 2(Δ) – $W_{II} = f(F_{CT})$

Рисунок 1.7 – Графіки залежностей $T_{II} = f(F_{CT})$ і $W_{II} = f(F_{CT})$ для шарошкового долота Ш215,9С-ГВ



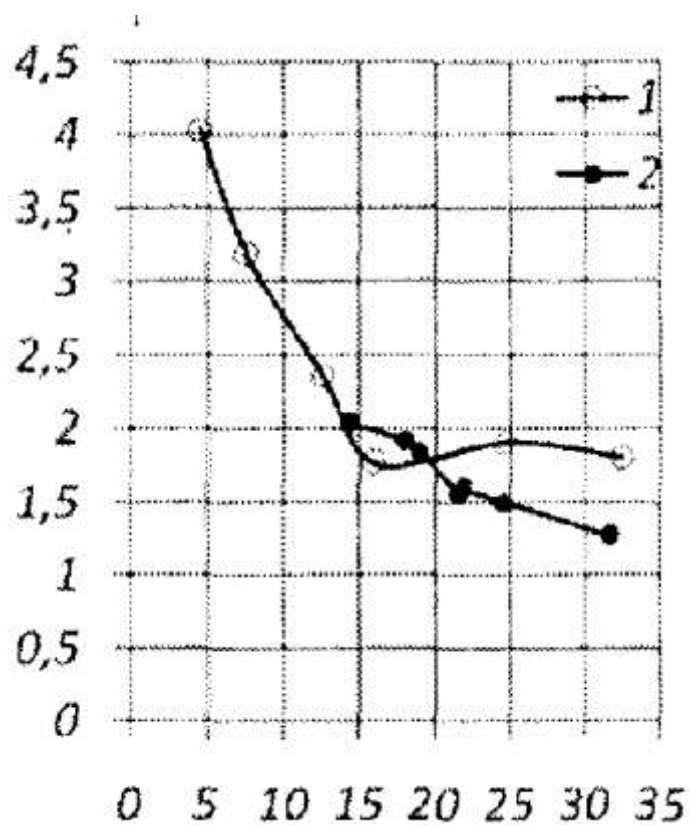
1(+) $-T_{II}$; 2(o) $-\bar{T}_d$, долото 8Л-188,7 РСА; 3(Δ) $-\bar{T}_d$; 4($\square$) $-\text{долото 8Л-188,7 РСА}$

Рисунок 1.8 – Графіки залежностей $\bar{T}_d = f(F_{CT})$ і $T_{II} = f(F_{CT})$ для долота 8Л-188,7 РСА



1 – долото діаметром 120,6 мм; 2 – долото діаметром 188,7 мм

Рисунок 1.9 – Графіки залежностей $\bar{T}_D = f(F_{CT})$



1 – долото діаметром 120,6 мм; 2 – долото діаметром 188,7 мм

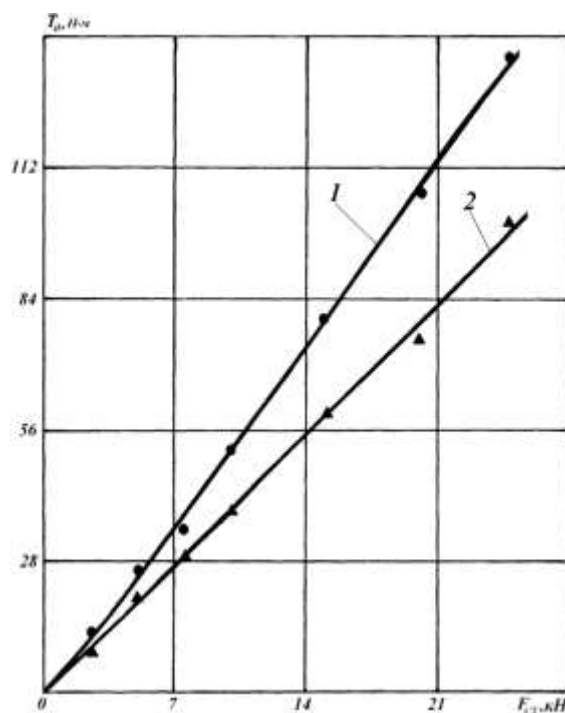
Рисунок 1.10 – Графіки залежностей $W_P = f(F_{CT})$

В [38,63] наведені результати стендових досліджень впливу осьового навантаження на моментоемність та енергоемність процесу буріння долотом PDC. Експериментальні залежності $\bar{T}_d = f(F_{CT})$ і $W_{II} = f(F_{CT})$, одержані за результатами цих досліджень, наведені відповідно на рис. 1.9 і 1.10.

За рис. 1.9 експериментальні значення моментоемності задовільно апроксимуються лінійним рівнянням регресії, перегини графіка $\bar{T}_d = f(F_{CT})$, які спостерігаються при бурінні шарошковими долотами і долотами PCA, відсутні, тобто процес руйнування гірської породи під час буріння долотом PDC більш стабільний. Такий висновок підтверджується характером зміни енергоемності, рис.1.10, за яким стрибкоподібне руйнування гірської породи відсутнє.

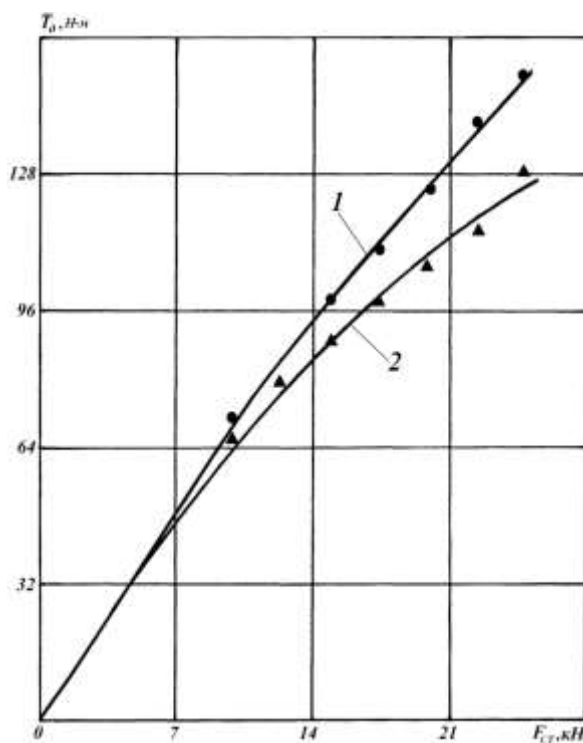
Мойсишин В. М. [1,61], на буровому стенді ІФНТУНГ [13], провів значний об'єм експериментальних досліджень впливу на моментоемність режиму буріння та параметрів компонування бурового інструменту, жорсткості та коефіцієнту демпфування. Під час проведення досліджень використовувався як класичний план так і факторний, за яким зовнішні незалежні чинники змінювались на 4-х рівнях, а їх комбінація ніколи не повторювалась.

На рис. 1.11, 1.12 вперше наведено експериментальні залежності величини моментоемності від осьового статичного навантаження при бурінні в породах різної твердості і компонуванням бурильного інструменту (КБІ) різної жорсткості, а на рис. 1.13 залежності середнього значення моменту на долоті від частоти обертання для різних значень жорсткості (КБІ). Одержані залежності підтверджують відповідні залежності, одержані іншими дослідниками (див. наведений вище матеріал). За рис. 1.11-1.13 із зменшенням жорсткості компонування бурильного інструмента моментоемність процесу буріння зростає.



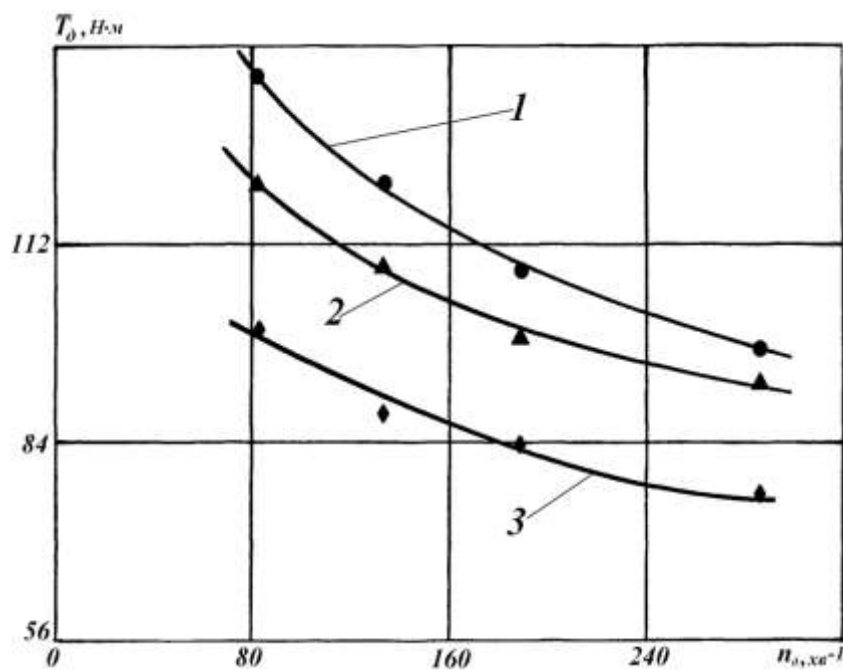
1(●) – жорсткість 225 кН/м; 2(▲) – жорсткість 6000 кН/м

Рисунок 1.11 – Графіки залежностей моментоемності процесу буріння від осьового статичного навантаження на долото



1(●) – жорсткістю 1480 кН/м; 2(▲) – жорсткістю 6000 кН/м

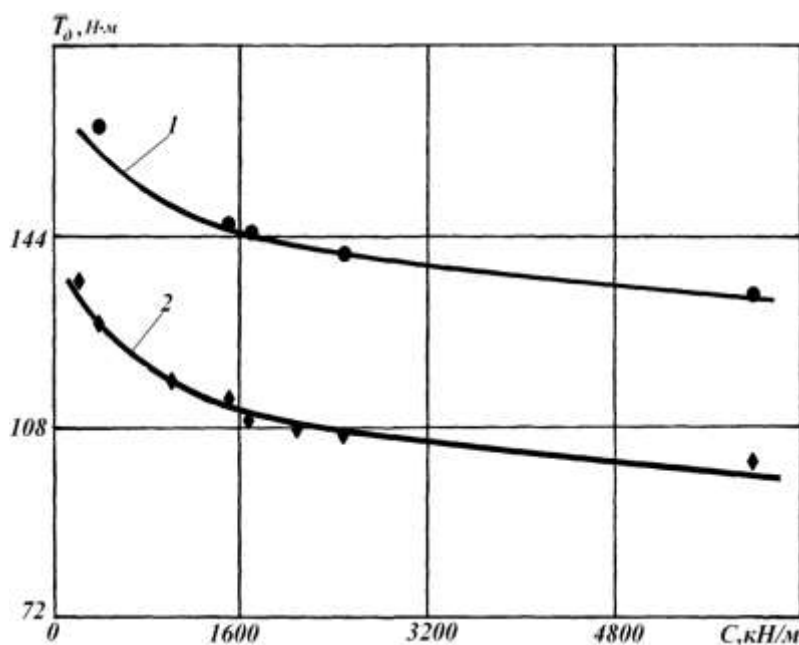
Рисунок 1.12 – Графіки залежностей моментоемності процесу буріння від осьового статичного навантаження на долото



1(●) – жорсткість 225 кН/м; 2(▲) – жорсткість 1000 кН/м;

3(◆) – жорсткістю 6000 кН/м

Рисунок 1.13 – Графіки залежностей моментоемності процесу буріння від частоти обертання долота



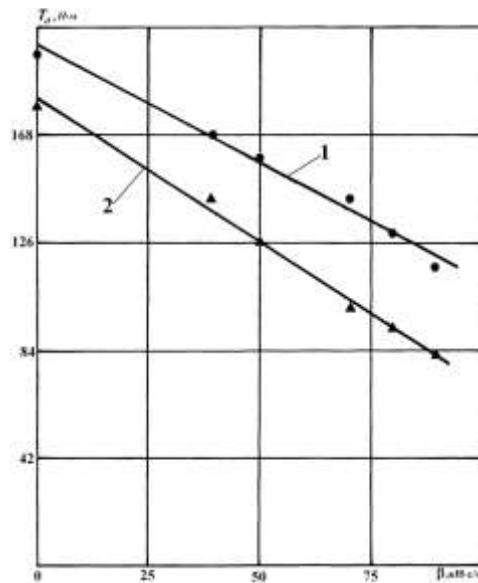
1(●) – долото III-93Т-ЦА, $p_{\text{ш}}=2500$ МПа;

2(◆) – долото III-76ОК-ЦА, $p_{\text{ш}}=3120$ МПа

Рисунок 1.14 – Графіки залежностей моментоемності процесу буріння від жорсткості бурильного інструменту

Емпіричні рівняння регресії залежностей $\bar{T}_d = f(F_{CT})$ і $\bar{T}_d = f(n_\theta)$, рис. 1.11-1.13, які задовільно апроксимують експериментальні значення, одержані в процесі проведення досліджень, можна подати степеневими функціями виду $Y = A X^B$.

На рис. 1.14 і 1.15 вперше наведено експериментальні залежності величини моментоемності від жорсткості та коефіцієнта демпфування бурильного інструменту при бурінні в породах різної твердості.



1(●) – прошарок твердістю 1440 МПа; 2(▲) – прошарок твердістю 2050 МПа

Рисунок 1.15 – Залежності середнього значення крутного моменту на долоті від демпфування під час буріння у блоках пісковику воротищенської світи

Емпіричні рівняння залежностей $\bar{T}_d = f(C)$, (рис. 1.14), які задовільно апроксимують експериментальні значення, одержані в процесі проведення досліджень, є степеневими функціями виду $Y = A X^B$, а емпіричні рівняння залежностей $\bar{T}_d = f(\beta)$ (рис. 1.15) – лінійними функціями виду $Y = A + BX$.

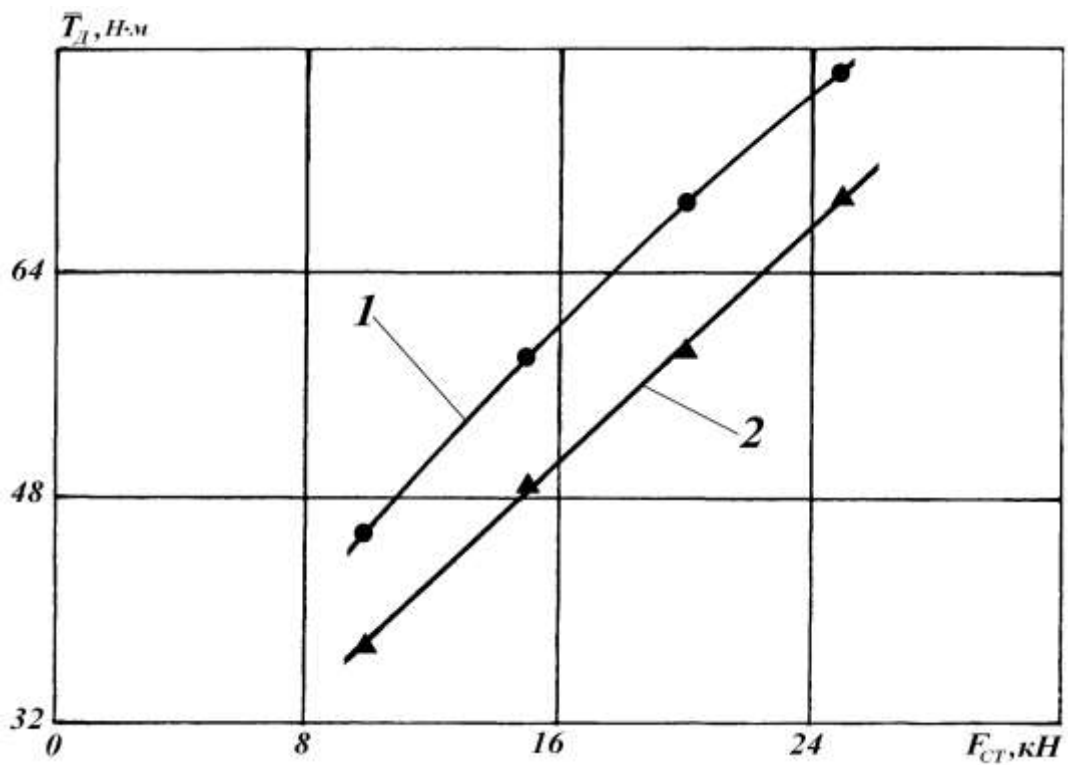
За результатами аналізу факторного експерименту [1] були встановлені емпіричні багатофакторні моделі множинної нелінійної кореляції:

для породи твердістю 1440 МПа

$$\bar{T}_\theta = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_\theta) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 37,0904 \cdot F_{CT}^{0,5913315} \cdot n_\theta^{-0,1526515} \cdot \beta^{-9,137159 \cdot 10^{-3}} \cdot C^{-0,04978878},$$

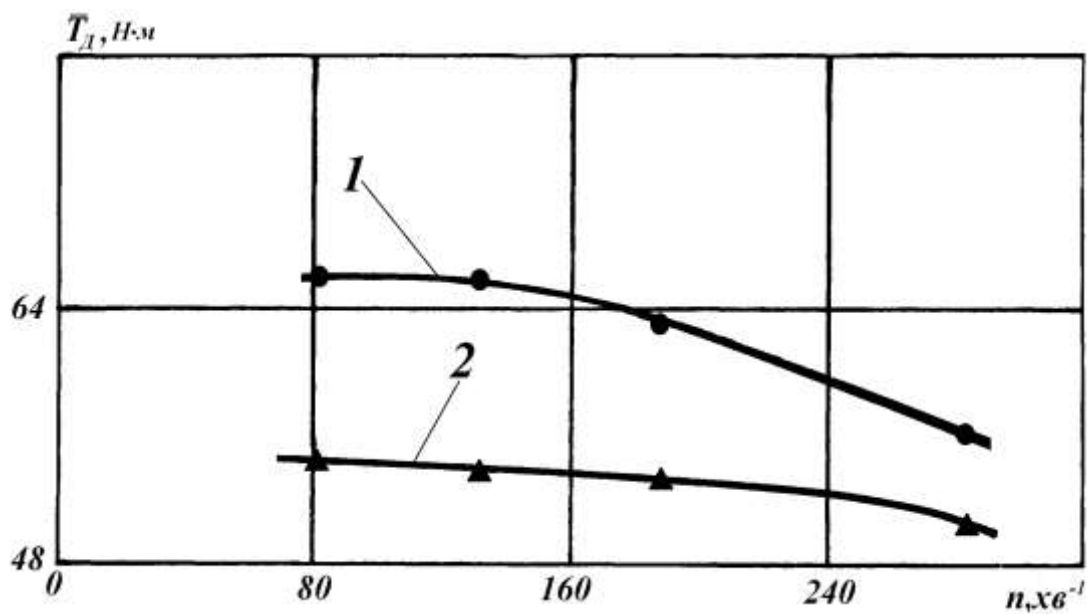
для породи твердістю 2050 МПа

$$\bar{T}_\theta = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_\theta) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 17,4463 \cdot F_{CT}^{0,6654357} \cdot n_\theta^{-0,07471396} \cdot \beta^{-0,008457633} \cdot C^{-0,05176454}.$$



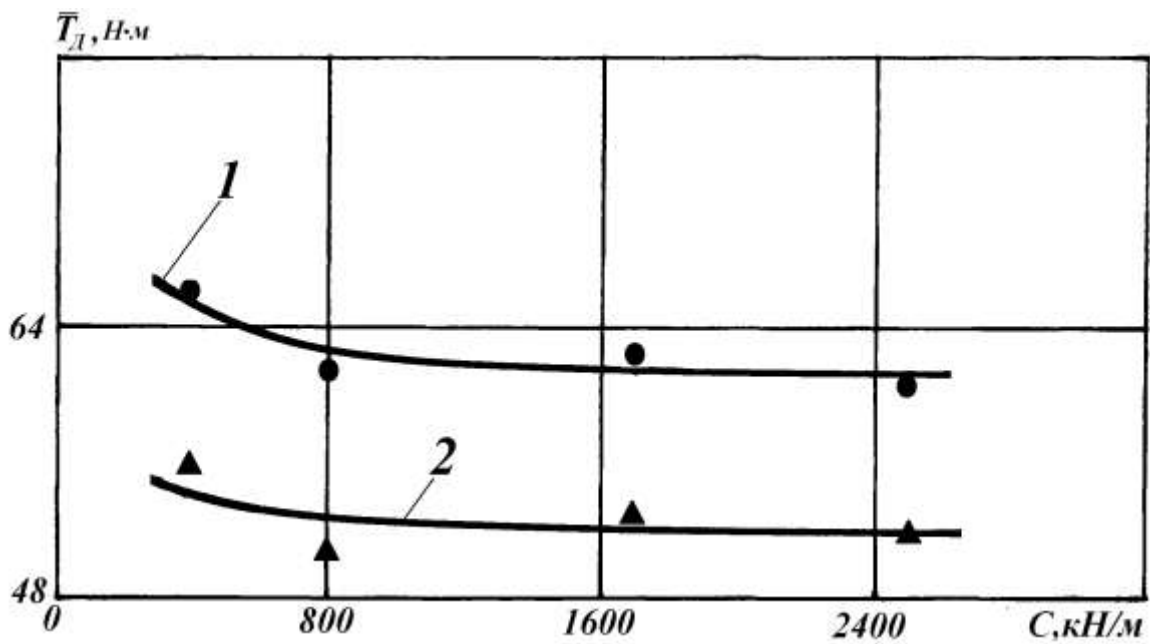
1(●) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(▲) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 1.16 – Графіки частинних залежностей $\bar{T}_o = f(F)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для порід різної твердості



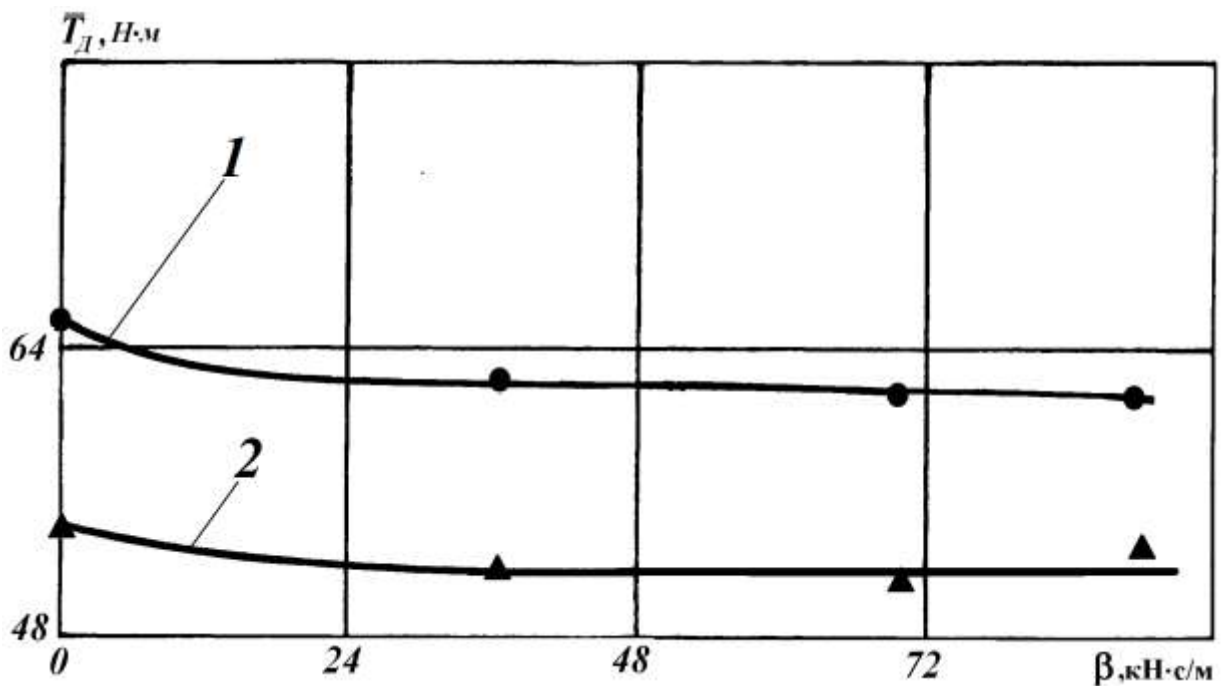
1(●) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(▲) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 1.17 – Графіки частинних залежностей $\bar{T}_o = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для порід різної твердості



1(●) – $p_u = 1440$ МПа ; 2(▲) – $p_u = 2050$ МПа

Рисунок 1.18 – Графіки частинних залежностей $\bar{T}_D = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для порід різної твердості



1(●) – $p_u = 1440$ МПа ; 2(▲) – $p_u = 2050$ МПа

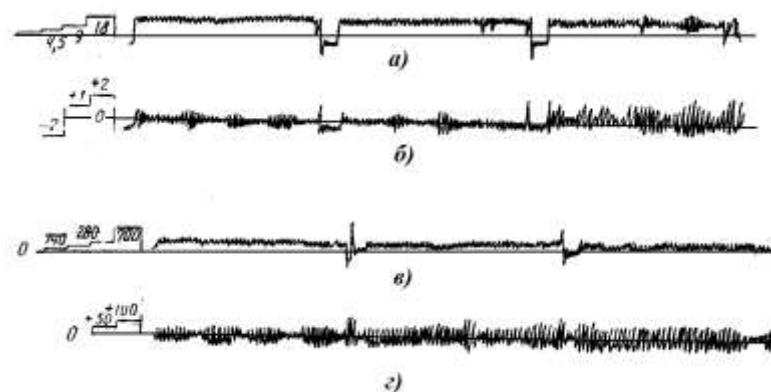
Рисунок 1.19 – Графіки частинних залежностей $\bar{T}_D = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для порід різної твердості

На рис. 1.16-1.19 наведено графіки частинних емпіричних залежностей від усіх чотирьох незалежних зовнішніх чинників, які представляють собою степеневі функції виду $Y = A X^B$, що узгоджуються із аналогічними залежностями, одержаними за результатами класичного експерименту.

1.3 Огляд стендових та промислових досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті при поглибленні свердловини

Процес зміни крутного моменту на долоті в часі представляє собою випадкову функцію, розподіл миттєвих значень якої відповідає певному закону. Якщо цей закон нормальний, то при певних значеннях автокореляційної функції, яка характеризує його внутрішню структуру, цей процес можна вважати стаціонарним і ергодичним, тобто визначення його характеристик можна оцінити за одною реалізацією.

При бурінні шарошковими долотами процеси зміни осьової динамічної сили і крутного моменту взаємозв'язані. Перше підтвердження такої відповідності було подано в роботі [39,65]. На рис. 1.20 наведено одночасні записи осьового навантаження на долото, осьового прискорення, крутного моменту і кутового прискорення свердловинним реєструючим приладом компанії "Esso Production Research", одержані під час випробувань цього приладу в період з березня 1984 р. по січень 1986 р.



а) – осьове навантаження на долото в тс; б) – осьове прискорення в м/сек²;

в) – крутний момент на долоті, кГм; г) – кутове прискорення в рад/сек²

Рисунок 1.20 – Записи параметрів процесу руйнування гірської породи на вибої, глибина свердловини 1373 м

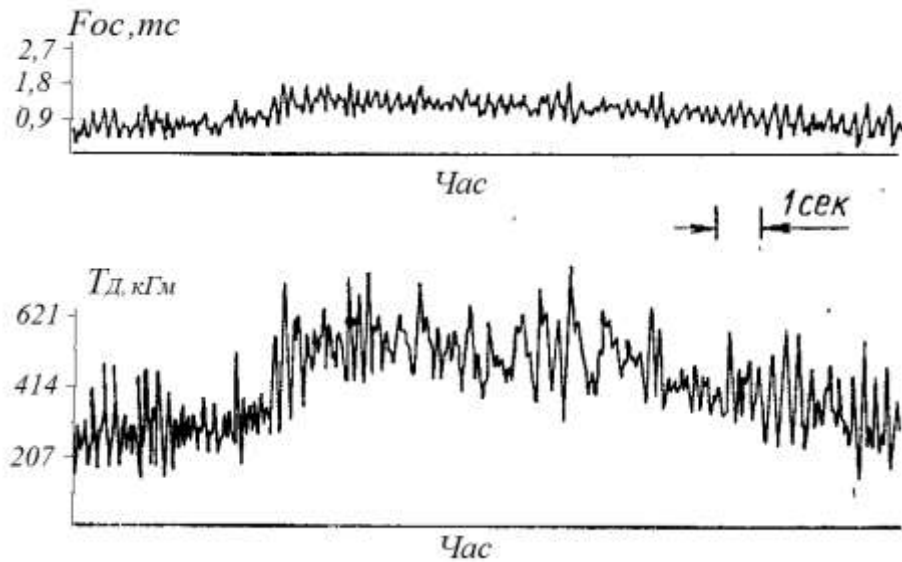


Рисунок 1.21 – Одночасні записи осьового навантаження на долоті і крутного моменту при швидкості обертання 140 хв^{-1} , глибина свердловини 1155 м

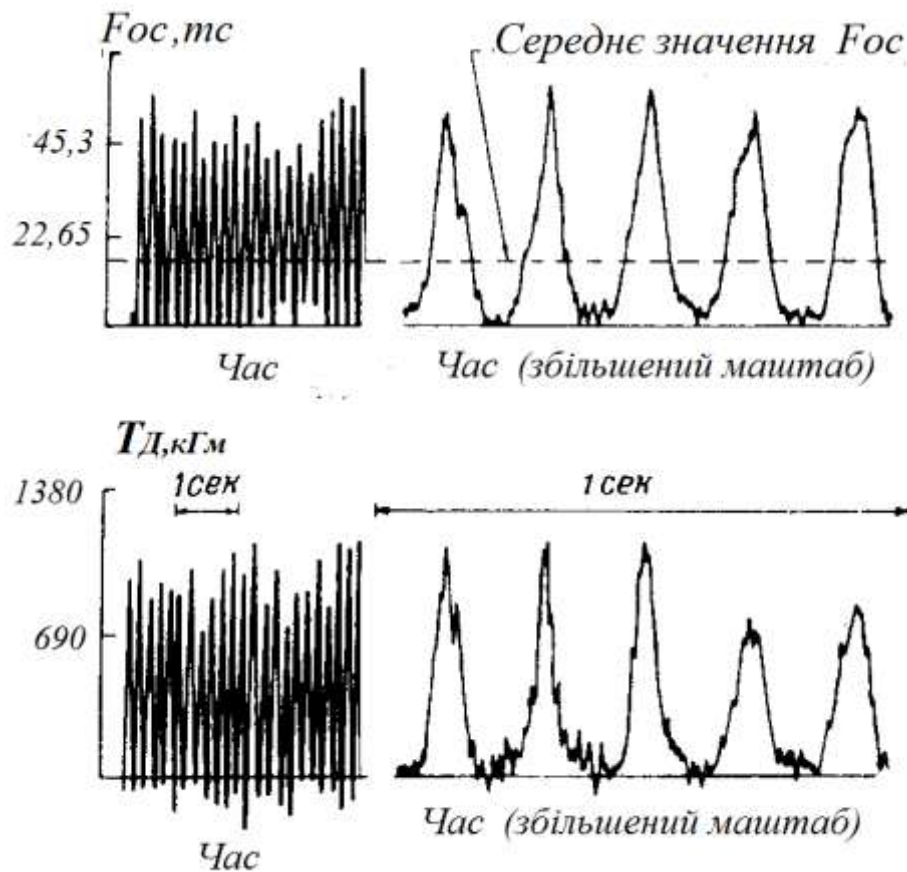


Рисунок 1.22 – Одночасні записи осьового навантаження на долоті і крутного моменту при швидкості обертання 110 хв^{-1} та імпульсній взаємодії долота з вибоєм, глибина буріння 1330 м, параметри бурового розчину не враховуються.

На рис. 1.21 наведено одночасні аналогові записи осьового навантаження на долото і крутного моменту, зафіксовані приладом компанії “Esso Production Research” (глибина буріння 1155 м).

На рис. 1.22 наведено одночасні аналогові записи осьового навантаження на долото і крутного моменту, зафіксовані приладом компанії “Esso Production Research”, під час виникнення значної вібрації бурильної колони (осьове навантаження на долото змінювалось від 0 до 63,5 тс, тобто процес руйнування породи імпульсний, глибина буріння 1600 м). Частоти коливань осьового навантаження та крутного моменту, за цими записами, однакові і відповідають трьом коливанням за обертанням. Частоти процесів зміни осьового і кутового прискорень ідентичні відповідним частотам процесів зміни осьового навантаження і крутного моменту.

За рис. 1.20-1.22 можна стверджувати, що процеси зміни осьового навантаження на долоті та крутного моменту на долоті є випадковими, але закономірності їх зміни однакові.

При більш детальному аналізі результатів записів параметрів взаємодії шарошкового долота з вибоєм свердловини приладом компанії “Esso Production Research” [40] було встановлено, що частота коливань осьового навантаження і крутного моменту однакові, але за рис. 1.23 пікові значення навантаження випереджають пікові значення моменту на фазовий зсув φ , який може змінюватись в діапазоні від 0^0 до 90^0 .

Взаємозв'язок між процесами зміни осьового навантаження і крутного моменту досліджувався Мавлютовим М. Р. і Санниковим Р. Х. [41] на експериментальній установці УНІ під час буріння долотами діаметром 33 мм в мармурі “Коелга”.

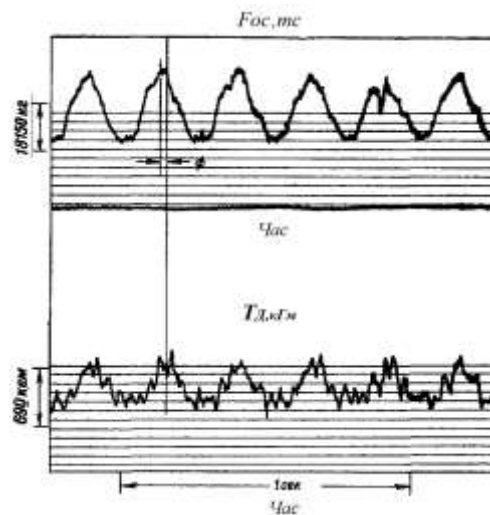
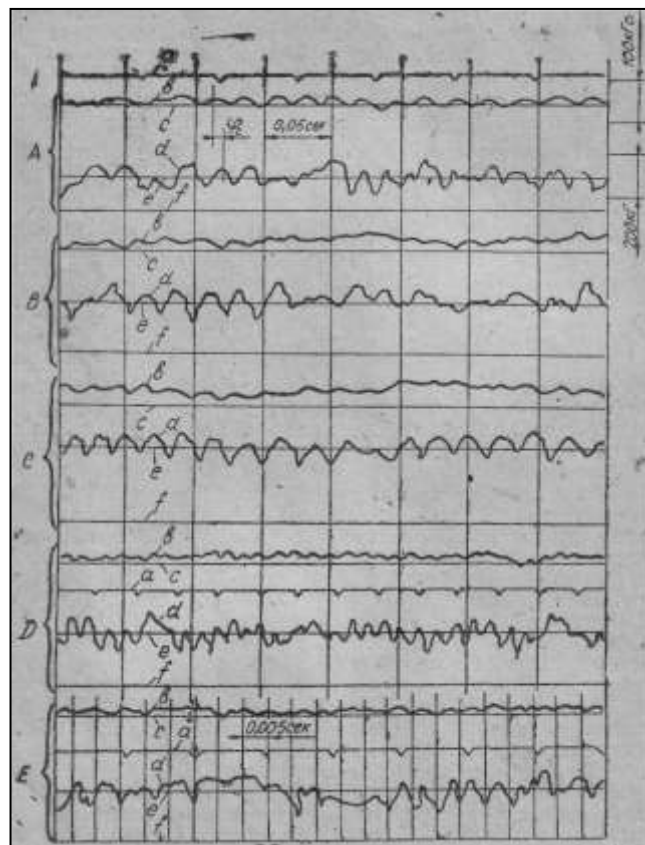


Рисунок 1.23 – Одночасні записи осьового навантаження і крутного моменту на долоті при швидкості обертання 90 хв^{-1} та фіксації фазового зсуву ϕ , глибина буріння 1330 м

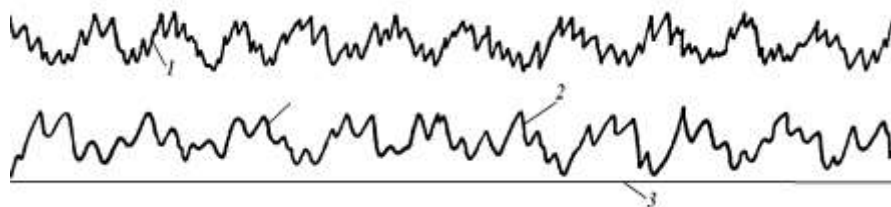


Параметри буріння: A – $F_{OC}=145 \text{ кгс}$, $n=100 \text{ хв}^{-1}$; B – $F_{OC}=238 \text{ кгс}$, $n=100 \text{ хв}^{-1}$; C – $F_{OC}=333 \text{ кгс}$, $n=100 \text{ хв}^{-1}$; D – $F_{OC}=238 \text{ кгс}$, $n=195 \text{ хв}^{-1}$; E – $F_{OC}=238 \text{ кгс}$, $n=400 \text{ хв}^{-1}$;

Рисунок 1.24 – Взірець осцилограми запису осьового зусилля і крутного моменту під час буріння модельним долотом діаметром 33 мм в мармурі “Коелга”

Аналіз результатів досліджень [41] дозволив з'ясувати, що процеси змін осьового навантаження на долоті і крутного моменту в часі носять коливний характер, викликаний зубчастою робочою поверхнею шарошок (див. рис. 1.24). Записи відображають зміну крутного моменту (**лінія в**) відносно нульової **лінії с** та коливання осьового зусилля (**лінія d**) відносно статичного навантаження на долото (**лінії е**). **Лінія f** відповідає нульовому навантаженню на долото, а **лінія а** – це дискретний запис частоти обертання долота (віддаль між двома мітками відповідає 0,1 оберта). Під час аналізу осцилограм було встановлено, що характерною особливістю запису моменту є те, що локальні максимуми запису, як правило, випереджають локальні максимуми запису навантаження. Аналогічний висновок можна зробити відносно локальних мінімумів осцилограм, тобто між максимумами і мінімумами осьового навантаження і моменту спостерігається зсув на фазовий кут φ .

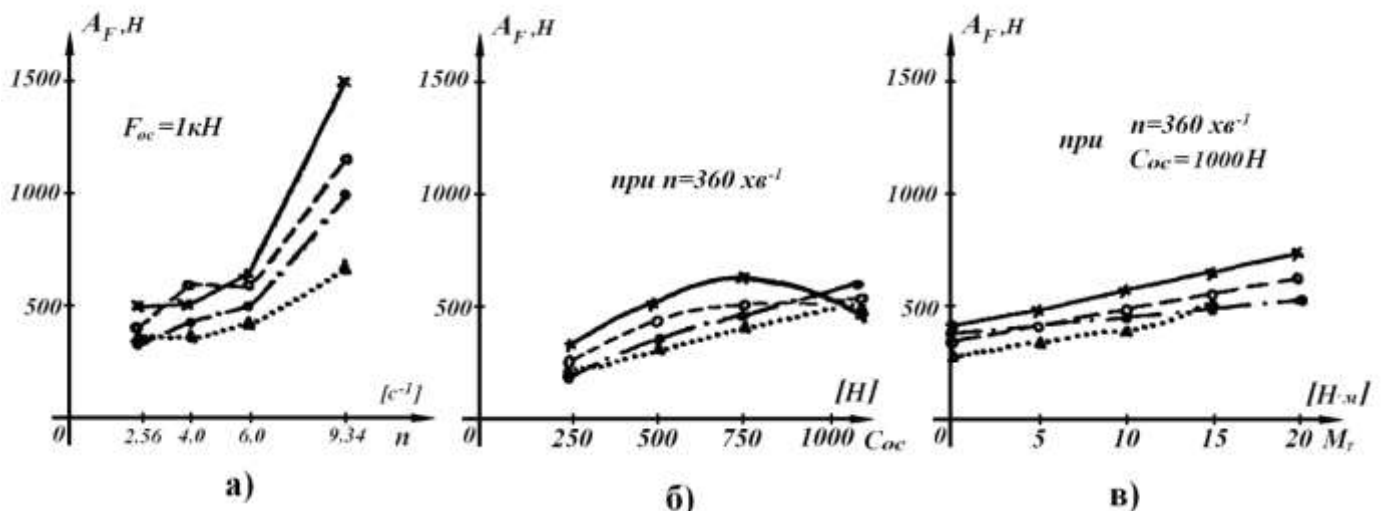
Наведений вище висновок підтверджений результатами стендових експериментальних досліджень [42,68]. Значення частоти зубцевих коливань осьового навантаження згідно цих досліджень, змінювалось від 30 до 280 Гц в діапазоні частоти обертання долота від 67 до 1000 хв^{-1} , і значення частоти зубцевих коливань крутного моменту повністю співпадає з цими значеннями. Експериментальні дослідження процесу зміни поздовжніх і крутильних коливань бурильної колони проводив Н. А. Горохов [43, 44] на вертикальному стенді Московського гірничо-розвідувального інституту (МГРІ), створеному на базі бурової вишки БУ-75. Осцилограми записів осьового навантаження та крутного моменту наведено на рис. 1.25.



1 – запис осьового навантаження, 2 – запис крутного моменту,
3 – нульова лінія моменту

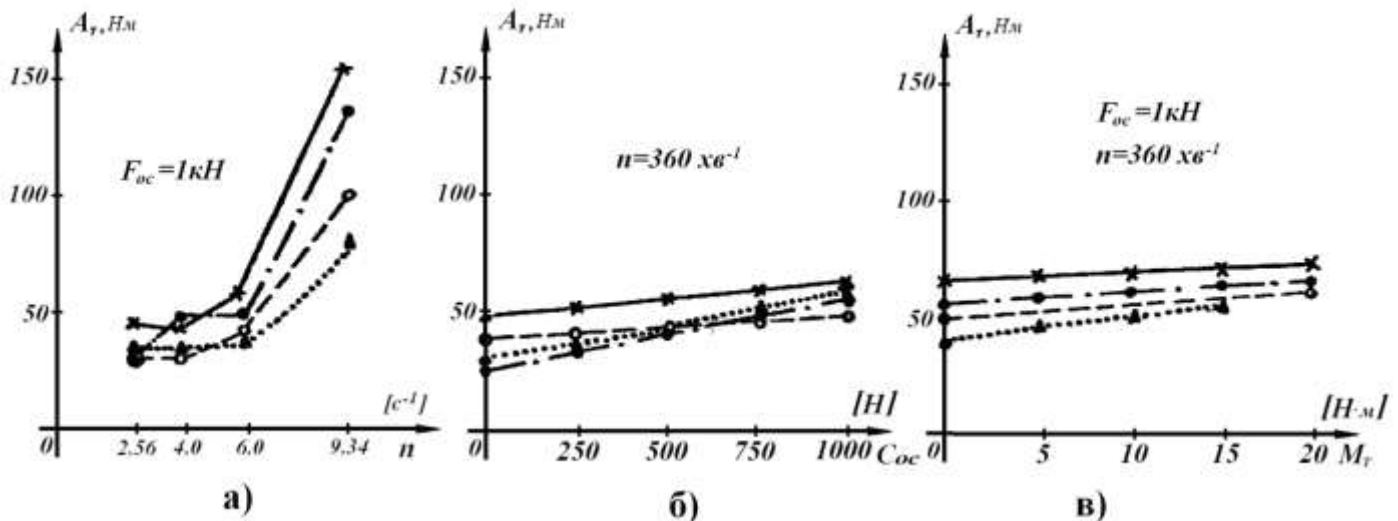
Рис. 1.25 – Осцилограми запису осьового навантаження та крутного моменту

Згідно з рисунком мінімуму поздовжніх коливань відповідає максимум крутильних коливань, тобто зміна цих коливань відбувається у протифазі.



× – бурильні труби СБТ-54; ○ – бурильні труби СБТ-42;
 ● – бурильні труби ЛБТН; ▲ – бурильні труби СБТ-33

Рис. 1.26 – Залежності амплітуд низькочастотних коливань осевого навантаження від: а) частоти обертання; б) статичного осевого навантаження; в) зовнішнього гальмівного моменту



× – бурильні труби СБТ-54; ○ – бурильні труби СБТ-42;
 ● – бурильні труби ЛБТН; ▲ – бурильні труби СБТ-33

Рис. 1.27 – Залежності амплітуд низькочастотних коливань крутного моменту від: а) частоти обертання; б) статичного осевого навантаження; в) зовнішнього гальмівного моменту

За результатами цих досліджень встановлено, що частотні спектри зміни осьового навантаження (поздовжні коливання) і крутного моменту (крутильні коливання) співпадають між собою і містять три складники, частоти яких відповідно становлять 0,1-1 Гц, 2-10 Гц і 15-40 Гц. Коливання на частотах 0,1-1 Гц зафіксовано тільки за максимальних значень осьового навантаження, кутової швидкості обертання колони та гальмівного моменту. Найбільшу енергію коливань зафіксовано на частотах 2-10 Гц, які відповідають одному обертові обертання колони (низькочастотні коливання, що генеруються шарошковими долотами). Коливання з такими частотами одержано для всіх режимів роботи. Частоти 15-40 Гц – не власні частоти колони. Залежності амплітуд низькочастотних (2-10 Гц) коливань осьового навантаження та крутного моменту від різних факторів зображено на рис. 1.26 та 1.27.

За наведеним вище матеріалом встановлено що процеси зміни осьового навантаження на долото і крутного моменту в часі ідентичні, і відносяться до класу випадкових функцій. Інформація про дослідження законів розподілу миттєвих значень крутного моменту на долоті і перевірка цього розподілу на його відповідність умовам стаціонарності і ергодичності на сьогоднішній день відсутня. Враховуючи повну ідентичність процесів зміни осьової динамічної сили і крутного моменту, що підтверджується аналізом наведених вище досліджень, для оцінки параметрів процесу зміни моменту використані результати досліджень, наведені в [45, 46, 48, 49,58]. За цими дослідженнями для часової довжини реалізації випадкової функції зміни моменту в часі, яка менша або рівна 4 с, встановлено що емпіричний закон розподілу миттєвих значень осьової динамічної сили (з ймовірністю 0,95 за критерієм Пірсона) відповідає нормальному теоретичному, незалежно від типу шарошкового долота. За цими ж дослідженнями підтверджено умови стаціонарності і ергодичності процесу зміни динамічної сили, що є підставою для використання тільки однієї реалізації запису процесу зміни F_{oc} під час аналізу внутрішньої структури осьової динамічної сили, яка визначається за графіком спектральної щільності.

В публікаціях [8, 9, 47, 52, 54, 56,69] наведені результати аналізу внутрішньої структури осьової динамічної сили, зроблених на основі графіків спектральної

щільності, одержаних для реалізацій її миттєвих значень, часова довжина яких не більша за 4 с.

За результатами цих експериментальних досліджень поздовжні коливання корпусу тришарошкового долота, як правило, двохкомпонентні, виділяють низькочастотні і зубцеві складові. Низькочастотні коливання тришарошкового долота виникають під час перекочування шарошок як гладких конусів по вибою свердловини.

Частоти цих коливань визначаються за формулою

$$f_H = \frac{N \cdot n_{\text{ДОЛ}}}{60} k, \text{Гц} \quad (1.17)$$

де N – число шарошок долота, які знаходяться в контакті з вибоєм, $N=1$ і 3 ; $n_{\text{ДОЛ}}$ – частота обертання долота, хв^{-1} ; k – коефіцієнт кратності до числа шарошок $N=3$, $k=1, 2, 3$ [7].

Коливання долота, які виникають при перекочуванні шарошок долота з зубця на зубець, називаються зубцевими.

Теоретичне значення частоти цих коливань залежить від розміщення зубців на поверхні шарошок і визначається за формулою

$$f_{\text{ЗВ}} = \frac{D_{\text{ДОЛ}} \cdot n_{\text{ДОЛ}} \cdot Z_{\min}}{d_{\text{Ш}} \cdot 60} \text{Гц}, \quad (1.18)$$

де $D_{\text{ДОЛ}}$ – діаметр долота; $d_{\text{Ш}}$ – діаметр шарошки; $Z_{\min}$ – мінімальне число зубців периферійного вінця шарошки долота.

Під час буріння шарошковими долотами із фрезерованими зубцями на вибої свердловини утворюється зубчаста периферійна рейка [7], яка впливає на процес взаємодії долота з вибоєм і збільшує або зменшує коефіцієнт проковзування. Результатом цього є відмінність між теоретичним і експериментальним значеннями частоти зубцевих коливань. Тип і параметри бурового розчину не зазначаються.

За кількістю виступів периферійної рейки експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначається за формулою

$$f_{\text{ЗВ}} = \frac{1}{t_{\text{ЗВ}}} = \frac{Z_P}{T} \text{Гц}, \quad (1.19)$$

де $t_{зуб}$ – час зубкових коливань, с; Z_P – число виступів рейки; T – час руху шарошки по периферійній рейці, с, що визначається за формулою

$$T = \frac{L}{V} = \frac{\pi \cdot d_{CB}}{\omega_{III} \cdot R_{III}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot i}{\omega_D \cdot R_{III}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot 30 \cdot d_{III}}{\pi \cdot n_{ДОЛ} \cdot R_{III} \cdot D_{ДОЛ}} = \frac{d_{CB} \cdot 60}{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ}}, c \quad (1.20)$$

де d_{CB} – діаметр свердловини, мм; ω_{III} – кутова швидкість обертання шарошки, c^{-1} ; R_{III} – радіус шарошки, мм.

Під час буріння долотом 93Т, частота обертання 82 хв^{-1} , в пісковнику воротищенської світи число виступів периферійної рейки – $Z_P=18$, рис. 1.28 [9]. За формулами (1.18)-(1.20) теоретичне і експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначаються за формулами (1.21)-(1.23).

$$f_{зуб}^T = \frac{D_{ДОЛ} \cdot n_{ДОЛ} \cdot Z_{min}}{d_{III} \cdot 60} = \frac{93 \cdot 82 \cdot 13}{58,75 \cdot 60} = 28,12 \approx 28 \text{ Гц} \quad (1.21)$$

При $d_{CB} \approx D_{ДОЛ}$

$$T = \frac{d_{CB} \cdot 60}{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ}} = \frac{93 \cdot 60}{82 \cdot 93} = 0,7317 \approx 0,732 \text{ с} \quad (1.22)$$

$$f_{зуб}^E = \frac{1}{t_{зуб}} = \frac{Z_P}{T} = \frac{18}{0,732} = 24,59 \approx 24,6 \text{ Гц} \quad (1.23)$$

Під час проведення експериментальних досліджень спектр осьової динамічної сили містить також власні частоти, які генеруються стендом при його роботі. Значення цих частот за енергетичним спектром віброприскорень корпусу стенда, (рис. 1.29), одержаним при нерухомому обертачі ($n_{дол}=0 \text{ хв}^{-1}$), наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Частоти гармонічних складників спектра віброприскорення стенда та розподіл енергії віброприскорення по цих частотах

Частота максимумів спектра, Гц	2,5	17,5	32,5	50	70	82,5	100
Дисперсія S_A , $(\text{м/с}^2)^2$	0,00118	0,00958	0,00159	0,0005	0,0003	0,005	0,0074



Рисунок 1. 28 – Поверхня вибою свердловини під час буріння долотом 93Т в пісковнику воротищенської світи твердістю $p_{ui}=1440$ МПа, число зубців периферійної рейки – 18

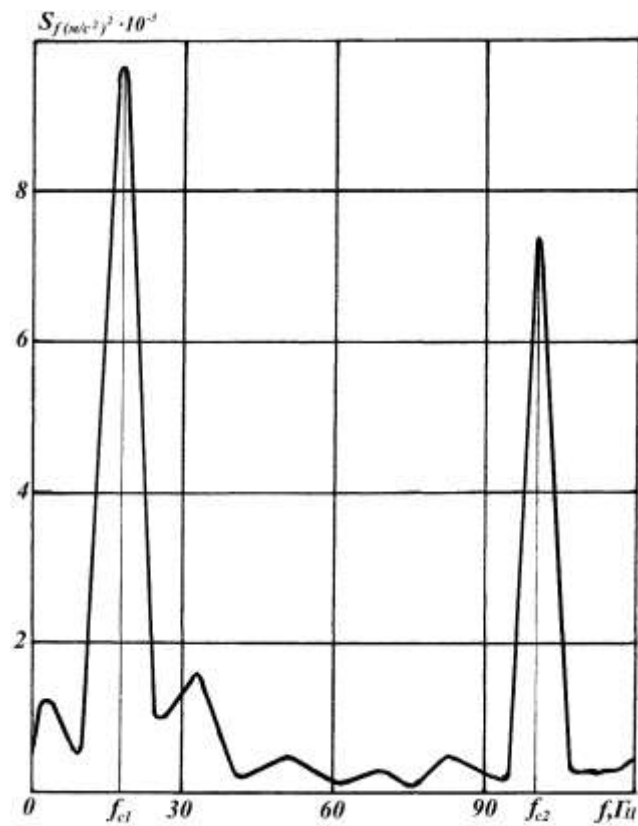
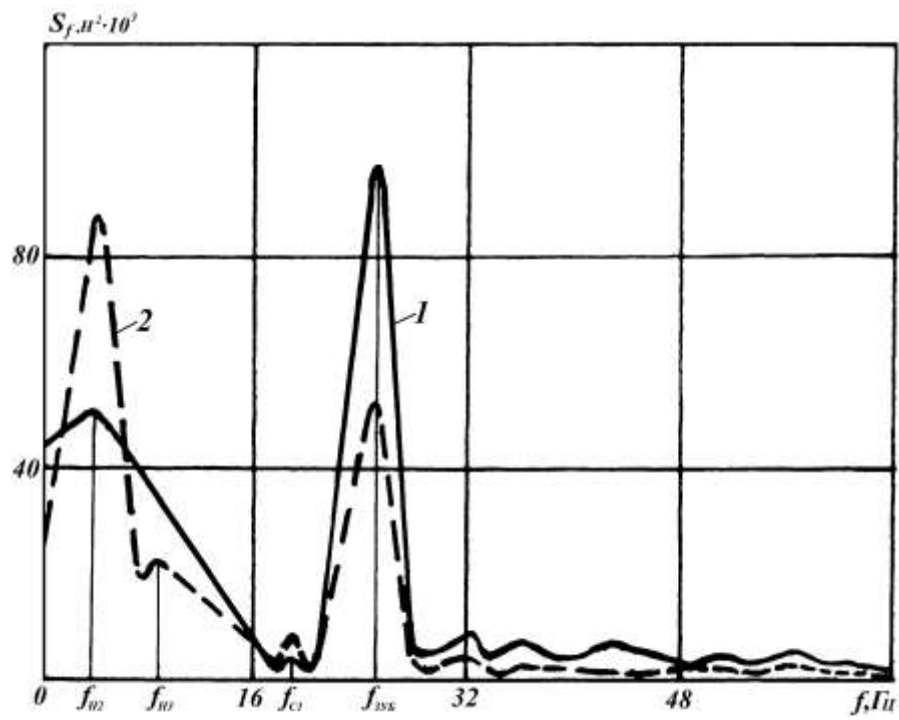
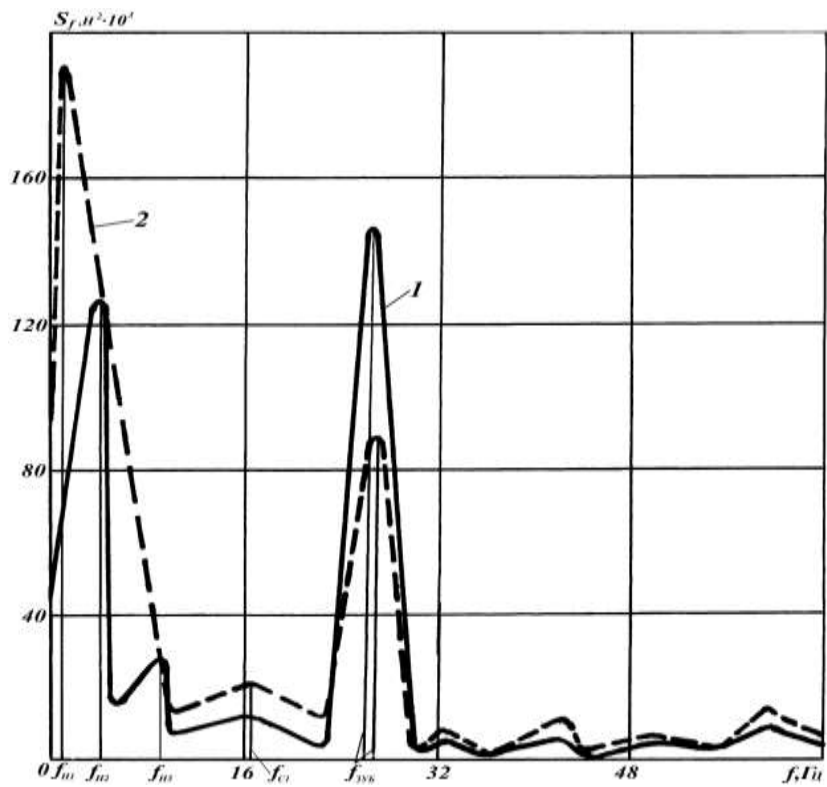


Рис. 1.29 – Енергетичний спектр віброприскорення корпусу стенда при нерухомому обертанні



1 – $C=225$ кН/м; 2 – $C=6000$ кН/м

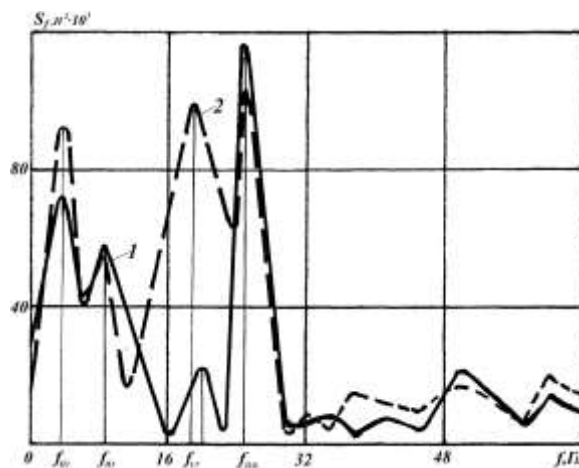
Рис. 1.30 – Енергетичний спектр осової динамічної сили під час буріння в пісковнику воротищенської світи твердістю $p_{ui}=1440$ МПа



1 – $C=225$ кН/м; 2 – $C=6000$ кН/м

Рис. 1.31 – Енергетичний спектр осової динамічної сили під час буріння в пісковнику стрийської світи твердістю $p_{ui}=2500$ МПа

На рис. 1.30-1.32 зображено енергетичні спектри осьової динамічної сили експериментальних досліджень, одержані при бурінні долотом ІІІ-93С в породах різної твердості бурильним інструментом різної жорсткості. За рис. 1.30-1.32 основна частина загальної енергії процесу зміни сили знаходиться певному частотному діапазоні в якому присутні низькочастотні та зубцеві коливання долота і перша основна гармонічна складова власних коливань корпусу стенда. Частотний діапазон залежить від частоти обертання долота, яка для цих рисунків становила 83 хв^{-1} , для якої основний інтервал частот спектра 0-32 Гц.



1 – $C=225 \text{ кН/м}$; 2 – $C=6000 \text{ кН/м}$

Рис. 1.32 – Енергетичний спектр осьової динамічної сили під час буріння в граніті твердістю $p_u=3120 \text{ МПа}$

В наукових працях та публікаціях [50, 51, 53, 55] наведені результати аналізу процесу зміни загальної енергії руйнування гірської породи враховуючи енергію низькочастотних і зубцевих коливань відповідно до зміни миттєвих значень крутного моменту в породах різної твердості бурильним інструментом різної жорсткості.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз стендових та промислових досліджень впливу параметрів процесу буріння (осьового статичного навантаження на долото F_{CT} і частоти обертання долота n_d) і параметрів компонування бурильного інструменту (жорсткості C та демпфування β) на процес зміни крутного моменту на долоті, проведено аналіз

існуючих конструкцій пристроїв зміни крутильної жорсткості. Основні дослідження, які проводились до 2000 р. стосувалися впливу параметрів буріння на середнє значення крутного моменту $\bar{T}_d$ (моментоемність). Починаючи з 2000 р. досліджувався вплив параметрів компоновання бурильного інструменту на величину $\bar{T}_d$ методом планованого факторного експерименту і були встановлені багатфакторні емпіричні моделі нелінійної множинної кореляції $\bar{T}_d = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n_d) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$. За цими дослідженнями встановлено, що зі збільшенням осевого статичного навантаження на долото F_{CT} середнє значення крутного моменту $\bar{T}_d$ зростає, а із збільшенням частоти обертання долота n_d – зменшується. Зі збільшенням жорсткості C та демпфування β – зменшується.

2. Починаючи з 2000 р. проводились дослідження по вивченню впливу параметрів процесу буріння і компоновання бурильного інструменту на E_T . За результатами стендових досліджень методом класичного експерименту встановлено емпіричні рівняння регресії $E_T = f(F_{CT})$, $E_T = f(n_d)$, $E_T = f(\beta)$ та $E_T = f(C)$. За цими залежностями зі збільшенням осевого статичного навантаження на долото F_{CT} величина енергії E_T зростає, а зі збільшенням n_d , C і β – зменшується.

3. Недоліком сучасних досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті є відсутність вивчення закону розподілу миттєвих значень крутного моменту на долоті і перевірка стаціонарності та ергодичності його процесу зміни при бурінні, а також невикористання методів спектрального аналізу для встановлення закономірностей зміни його внутрішньої структури.

4. Пульти управління бурінням сучасних бурових верстатів безперервно фіксують зміну крутного моменту на долоті протягом буріння всієї свердловини. За цих умов є можливість використання експрес-методу контролю процесу зміни крутного моменту в процесі буріння. За показник експрес-методу пропонується використати подвійну амплітуду коливного процесу зміни крутного моменту на долоті, яка представляє собою різницю між найбільшим і найменшим поточними значеннями крутного моменту, що фіксуються датчиками пульта управління процесом буріння.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Підбір апроксимуючих (згладжуючих) емпіричних рівнянь регресії за програмою App.1. Визначення емпіричного значення коефіцієнта кореляції

Під час аналізу результатів експериментальних досліджень процесів взаємодії бурового долота з вибоєм свердловини, як в стендових так і в промислових умовах, виникає необхідність встановлення залежності між двома змінними фізичними величинами, наприклад між механічною швидкістю буріння, яка є залежною змінною величиною y , і незалежною змінною x , якою є частота обертання долота.

Представлення цієї залежності деякою функцією називається регресією, і задачею регресії є визначення її параметрів. Функція $y=f(x)$ із значеннями регресійних параметрів називається рівнянням регресії або рівнянням математичної моделі. Таке рівняння одержане за дискретними експериментальними даними називається емпіричним. Якщо за цим рівнянням функція не проходить через ці значення залежної змінної величини y_i , то процес наближення цих значень до значень рівняння регресії називається апроксимацією.

Основним методом апроксимації, наближенням експериментальних значень y_i до значень $y_i(x_i)$, визначених за рівнянням регресії, є метод найменших квадратів який базується на мінімізації суми квадратів відхилень між значеннями y_i і $y_i(x_i)$.

Визначення параметрів рівняння регресії за методом найменших квадратів розглянемо на прикладі лінійної залежності виду $Y=AX+B$. Аналітично ця умова записується у вигляді

$$F = \sum_{i=1}^n [y_i - y_i(x_i)]^2 = \min. \quad (2.1)$$

Для прогнозованого рівняння регресії $Y=AX+B$ рівняння (2.1) буде мати вигляд

$$F = \sum_{i=1}^n [y_i - Ax_i - B]^2 = \min. \quad (2.2)$$

Знайдемо похідні по A і B від функції F і прирівняємо їх до нуля:

$$\frac{dF}{dB} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B) = 0. \quad (2.3)$$

$$\frac{dF}{dA} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - Ax_i - B) \cdot x_i = 0. \quad (2.4)$$

Із рівняння (2.3)

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n (Ax_i + B). \quad (2.5)$$

Із рівняння (2.4)

$$\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + B \cdot x_i). \quad (2.6)$$

Із рівнянь (2.5) і (2.6) знаходимо невідомі параметри A і B рівняння регресії

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.7)$$

$$B = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - A \cdot \sum_{i=1}^n x_i \right). \quad (2.8)$$

Аналогічно одержимо формули визначення параметрів A і B ще для дев'яти рівнянь регресії і наводимо ці формули в табл. 2.1.

Основними характеристиками, за якими визначається зв'язок між величинами y і x , є кореляційний момент μ_{xy} і коефіцієнт кореляції ρ . В більшості випадків при обробці експериментальних даних закон розподілу двовірної випадкової величини (X , Y) невідомий. В цьому випадку для оцінки зв'язок між величинами y і x використовують точкові оцінки K_{xy} і r , які називаються відповідно емпіричним кореляційним моментом і емпіричним коефіцієнтом кореляції і визначаються за формулами

$$K_{XY} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (2.9)$$

$$r = \frac{K_{XY}}{S_X \cdot S_Y} = \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2.10)$$

Згідно [16], якщо графік регресії криволінійний, то оцінка тісноти зв'язку між величинами y і x характеризується емпіричним коефіцієнтом кореляції r_{kk} який визначається за формулою

$$r_{kk} = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_{y.e}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{y.f.i} - \bar{y}_E)^2 / n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{y.e.i} - \bar{y}_E)^2 / n}}, \quad (2.11)$$

де $\sigma_{y.f}$ – середнє квадратичне відхилення між значеннями рівняння регресії і середнім значенням експериментальних значень $\bar{y}_E$; $\sigma_{y.e}$ – середнє квадратичне відхилення між експериментальними значеннями y_i і середнім цих значень $\bar{y}_E$.

Залежності для визначення емпіричних значень r , визначені з використанням формул (2.10), наведені в табл. 2.1.

Основна похибка при використанні запропонованих рівнянь регресії визначається за формулою

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{y.f.i} - y_{y.e.i})^2}{n-1}}. \quad (2.12)$$

Для обчислення параметрів рівнянь регресії за формулами, наведеними в табл. 2.1, розроблено програмне забезпечення в середовищі Visual Studio на мові програмування C Sharp за допомогою фреймворку Windows Form Application, що дає можливість створювати програми для операційних систем Windows. Програма одержала назву App.1. За аналог запропонованого програмного забезпечення була вибрана програма “Визначення виду емпіричної залежності методом найменших квадратів” [17], яка була розроблена для операційної системи MS-DOS, скріншот програми зображено на рис. 2.1. Операційне програмне забезпечення MS-DOS не підтримується сучасними конструкціями комп’ютерів і є застарілою і тому виникла необхідність в розробці програми визначання коефіцієнтів рівнянь регресії, адаптованої до операційних систем Windows. Запропоноване програмне забезпечення окрім визначення коефіцієнтів рівнянь регресії визначає також і емпіричні значення коефіцієнта кореляції r , (формула (2.10)), і коефіцієнта r_{kk} кореляції для нелінійної (криволінійної) залежності за методикою наведеною в [16] (формула (2.11)).

Таблиця 2.1 – Формули для визначення параметрів A і B та квадрата емпіричного коефіцієнта кореляції r^2

№ п/п	Вид залежності	A	B	r^2
1	$Y = A \cdot X + B$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - A \cdot \sum_{i=1}^n x_i)$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}$
2	$Y = \frac{X}{A \cdot X + B}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{y_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i / y_i - A \cdot \sum_{i=1}^n x_i)$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 / y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{y_i} \right)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i})^2 \right]}$
3	$Y = \frac{I}{AX + B}$	$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{y_i} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n I / y_i - A \cdot \sum_{i=1}^n x_i)$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i / y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i} \right)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i})^2 \right]}$
4	$Y = A \cdot X^B$	$\frac{\sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \ln y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln y_i}{\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln x_i)^2}$	$\exp \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln y_i - B \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i) \right]$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \ln y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (\ln y_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln y_i)^2 \right]}$
5	$Y = A + B \cdot \ln X$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \ln x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln x_i)^2}$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - B \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i)$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot \ln x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \ln x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (\ln x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (y_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}$

Продовження табл. 2.1

№ п/п	Вид залежності	A	B	r^2
6	$Y = A \cdot B^X$	$\lg A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n \lg y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot \lg y_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$ $A = 10^{\lg A}$	$\lg B = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \lg y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$ $B = 10^{\lg B}$	Обчислюється значення коефіцієнта r_{KK}
7	$Y = \frac{A}{X} + B$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - B \cdot \sum_{i=1}^n x_i)$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i)^2 \right]}$
8	$Y = A + B\sqrt{X}$	$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i - B \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i})$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sqrt{x_i} - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{x_i})}{\sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \sqrt{x_i})^2}$	Обчислюється значення коефіцієнта r_{KK}
9	$Y = A + B \lg X$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \lg x_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \lg x_i)^2}$	$\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n y_i \cdot \lg x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n \lg x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\lg x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \lg x_i)^2}$	Обчислюється значення коефіцієнта r_{KK}
10	$Y = A \cdot e^{BX}$	$\exp \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln y_i - B \cdot \sum_{i=1}^n x_i) \right]$	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i \cdot \ln y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n \ln y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (\ln y_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n \ln y_i)^2 \right]}$

Примітка: При відсутності формули для визначення емпіричного значення коефіцієнта r кореляційний зв'язок між величинами Y і X оцінювати за значенням коефіцієнта r_{KK} .

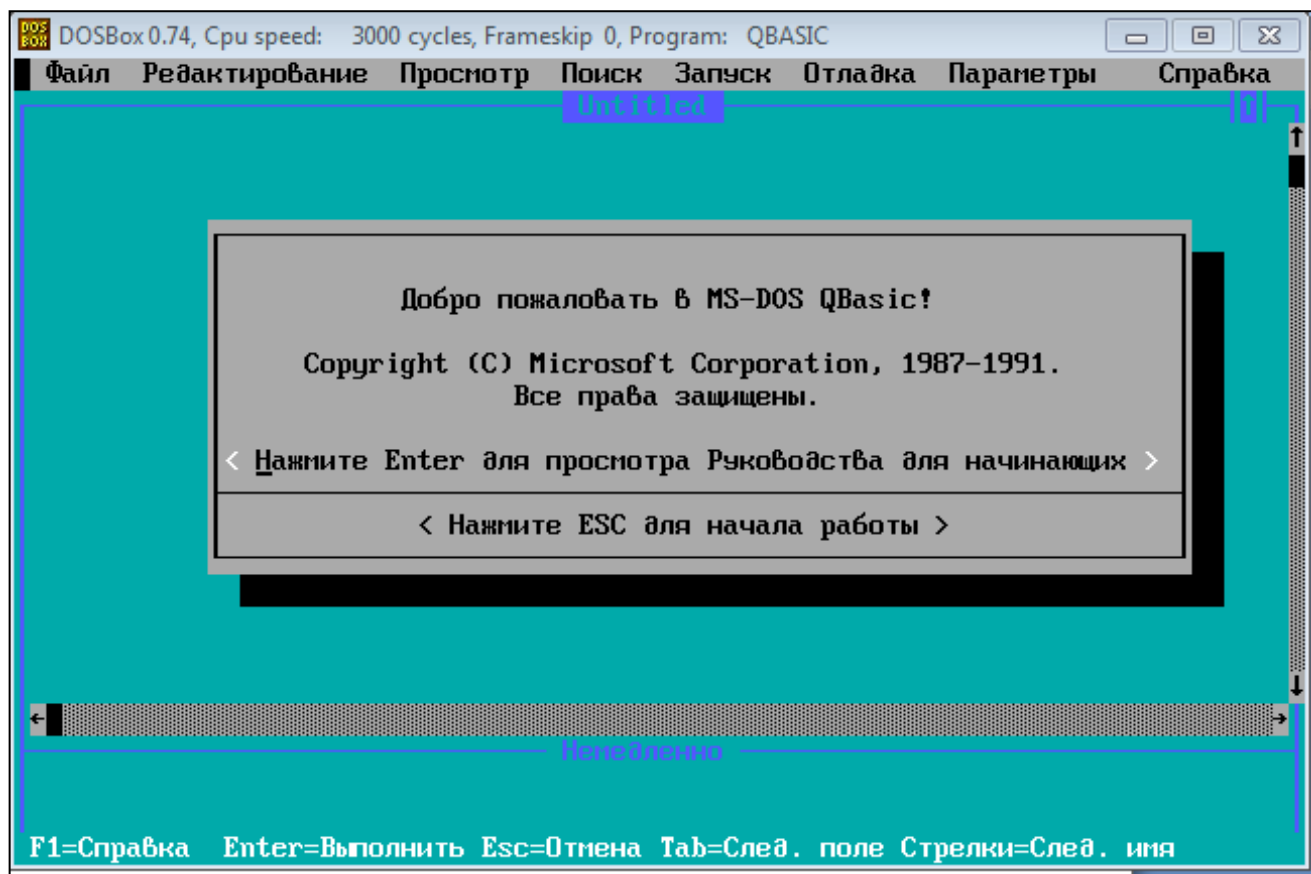


Рисунок 2.1 – Скріншот титульної сторінки програмного забезпечення для операційної системи MS-DOS

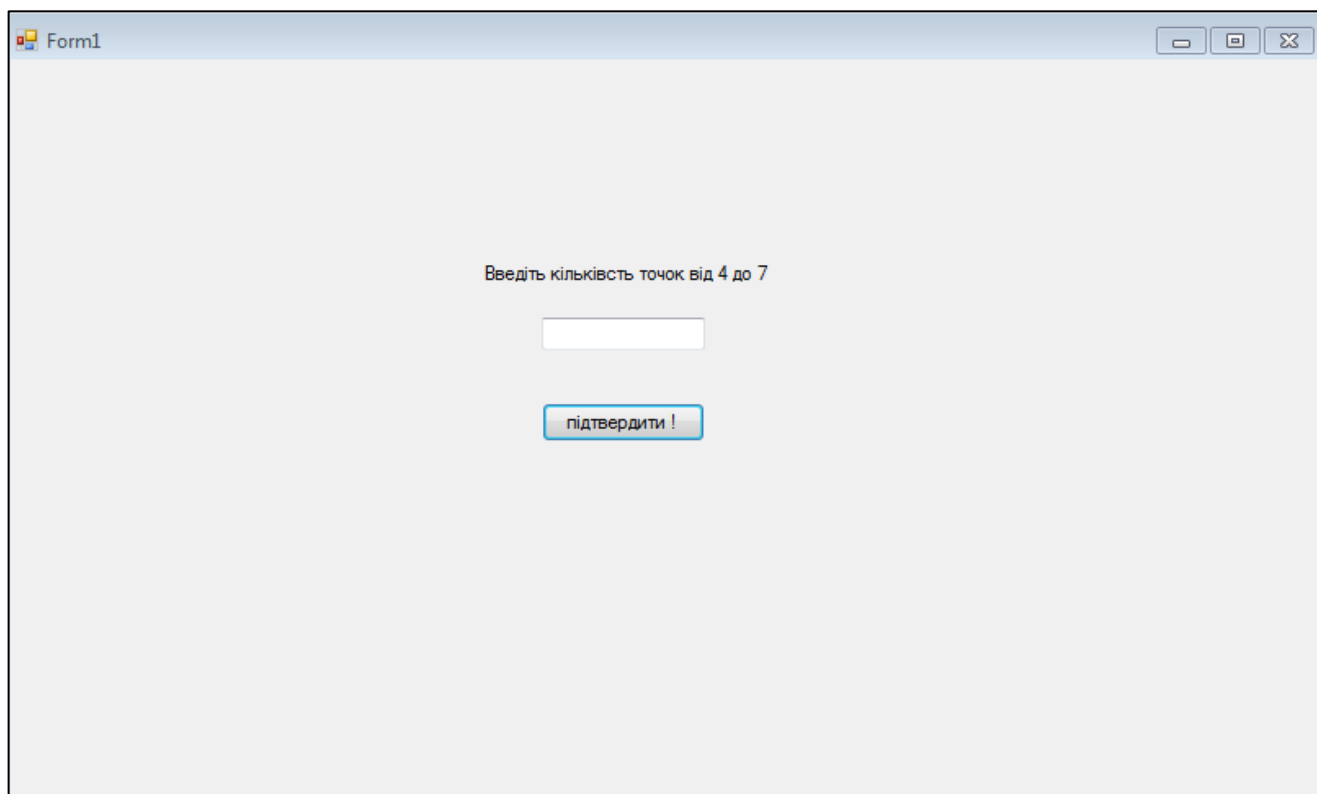


Рисунок 2.2 – Вікно введення кількості експериментальних точок

Введіть дані й точки

№	ВІД ЗАЛЕЖНОСТІ	A	B	Сигма	R	R _{adj}
1. x 82	1. y 1026	1. $Y = AX + B$				ВІДСУТНЄ
2. x 133	2. y 1088	2. $Y = K/(AX + B)$				
3. x 188	3. y 1529	3. $Y = 1/(AX + B)$				
4. x 285	4. y 1817.5	4. $Y = A * X^B$				
		5. $Y = A * B^X$				
		6. $Y = A * B^X$			ВІДСУТНЄ	
		7. $Y = A / (X + B)$				
		8. $Y = A * B^X$			ВІДСУТНЄ	
		9. $Y = A * B^X$			ВІДСУТНЄ	
		10. $Y = A * B^X$				

Обчислити

Вибрати модель обчислення

Зберегти в файл

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

МАТЕМАТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ

ФУНКЦІЯ

АРГУМЕНТИ

Вікно обліку обчислень

модель обчислення

Настроювання...

Рисунок 2.3 – Вікно введення вхідних даних

Введіть дані й точки

№	ВІД ЗАЛЕЖНОСТІ	A	B	Сигма	R	R _{adj}
1. x 82	1. y 1026	4.19817028930062	643.296038504813	83.8030125182954	0.5710021173252427	ВІДСУТНЄ
2. x 133	2. y 1088	0.000341174952289187	0.0418903027446889	112.599549814037	0.94146584424858	0.993786264720808
3. x 188	3. y 1529	-2.24882934028711E-06	0.00198130183067178	124.695747395648	0.954142421809004	1.05276269677324
4. x 285	4. y 1817.5	109.947006328247	0.493565448820621	98.4032757412228	0.952768556646188	0.929138427542608
		2644.41448555902	675.62460530527	117.341115493985	0.950044179380364	0.95004417068366
		787.553328809184	1.00323858195431	99.5899914737419	ВІДСУТНЄ	0.991862504579479
		-128554.810465798	2204.20752089185	208.544288928805	0.883395022522913	1.20542940410016
		32.2015740318752	109.2962578885	97.123223318031	ВІДСУТНЄ	0.98899695958491
		2644.41448555897	1955.69314483987	117.341115493985	ВІДСУТНЄ	0.95004417068335
		787.553328809101	0.0003396476432688	99.589991473741	0.943336806232277	0.991862504579463

Обчислити

Вибрати модель обчислення

Зберегти в файл

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

МАТЕМАТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ

ФУНКЦІЯ

АРГУМЕНТИ

Вікно обліку обчислень

модель обчислення

Настроювання...

Рисунок 2.4 – Вікно з результатами обчислень параметрів рівняння регресії

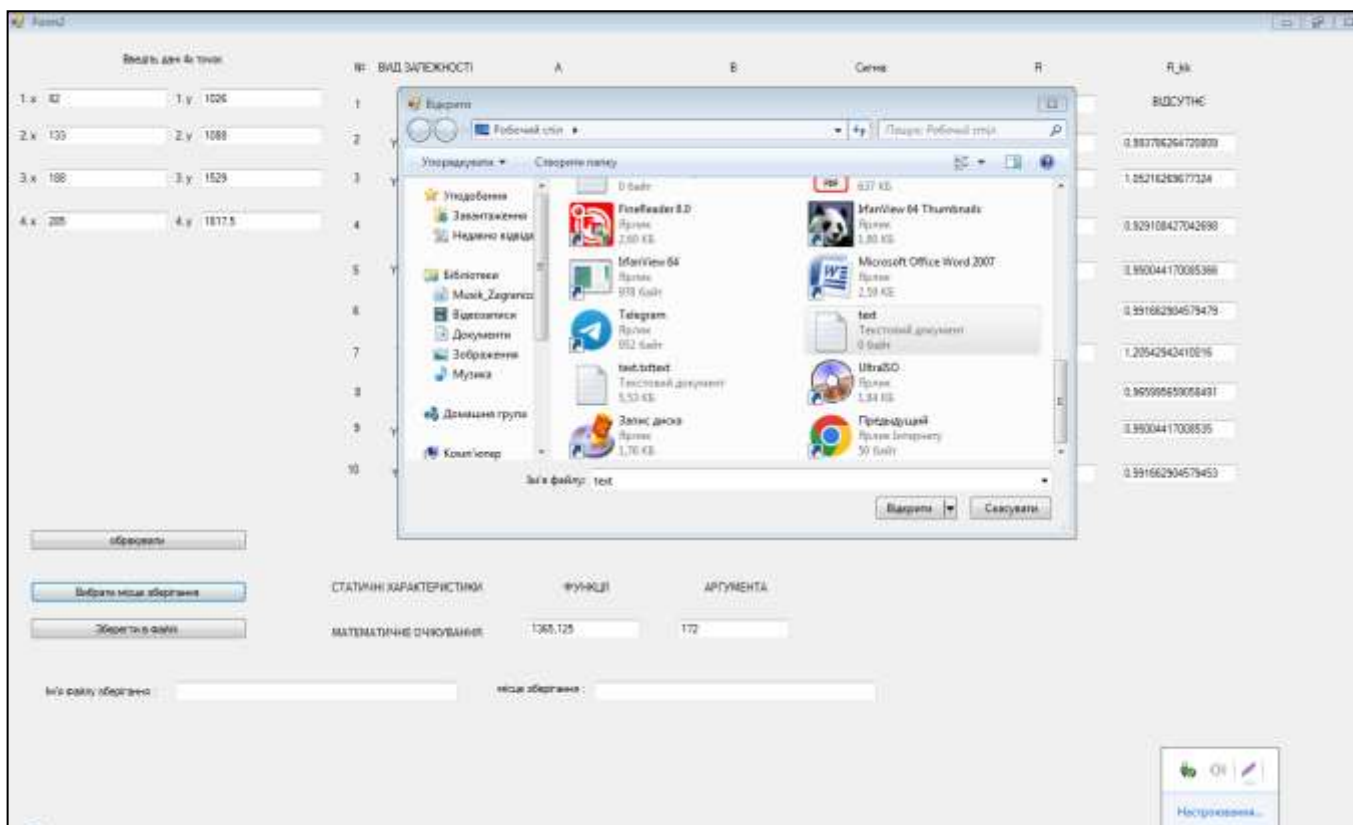


Рисунок 2.5 – Вікно з вибором місця зберігання результатів обчислень в форматі txt (блокнот).

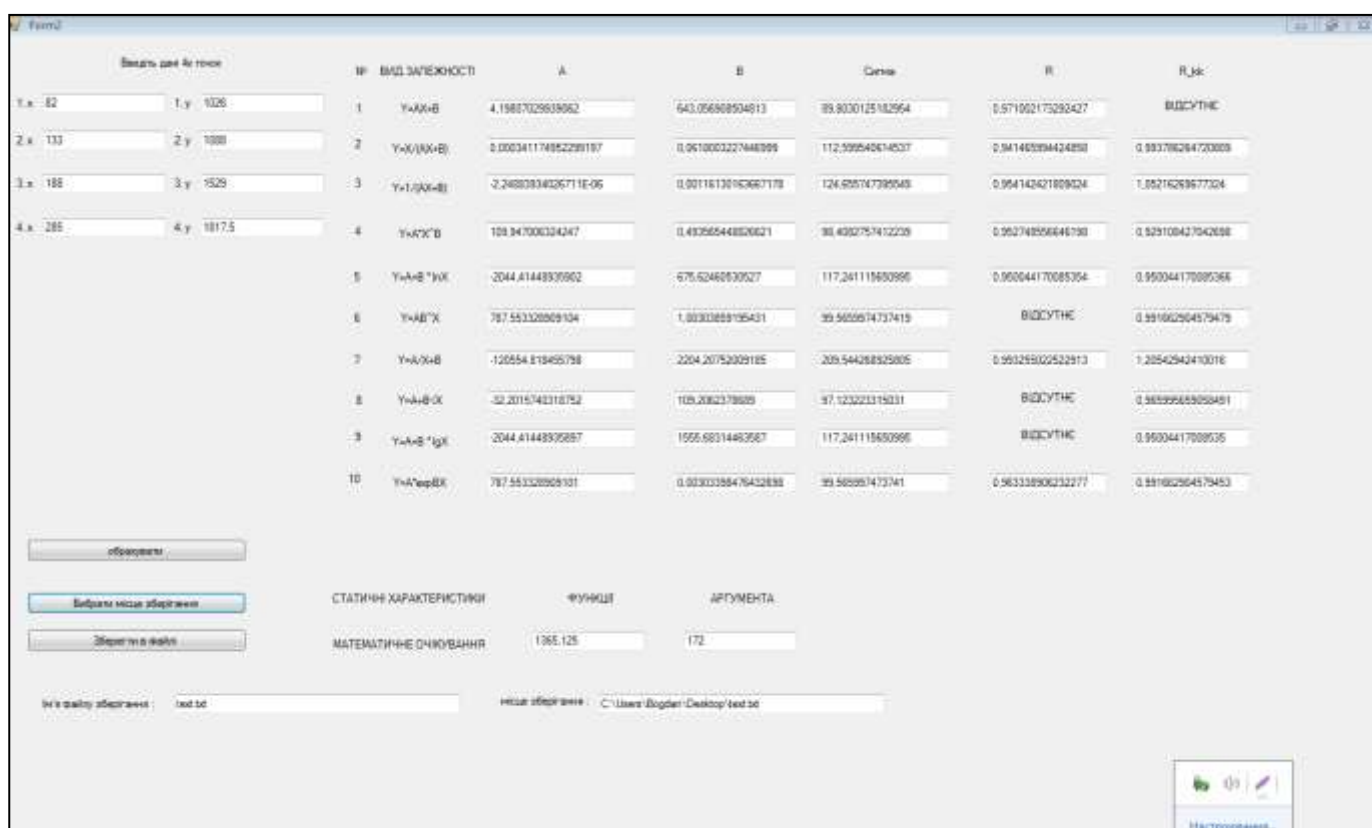
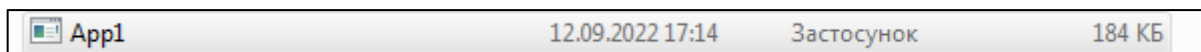


Рисунок 2.6 – Вікно з місцем зберігання результатів обчислень

Порядок роботи з програмою App.1 наведено на рис.2.2-2.6

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



2. В вікні Form 1 ввести кількість експериментальних точок ($n = 4-7$) для підбору рівнянь регресії.

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

4. Натиснути кнопку Обрахувати.

5. Натиснути кнопку Вибрати місце зберігання в форматі txt (блокнот).

6. Після вибору місця зберігання натиснути кнопку Зберегти в файлі.

Програму App.1 доцільно використовувати для монотонно зростаючих або спадаючих значень функцій. Якщо за експериментальними значеннями спостерігається локальний максимум або мінімум, то для апроксимації цих значень доцільно використовувати поліноми другого або третього порядків.

На програмне забезпечення “Визначення емпіричних рівнянь регресії. Програма App.1” було подано заявку №с202204847 на реєстрацію авторського права на твір, за якою було отримано свідоцтво за №115868.

2.2 Методика створення багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції

Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції створюється за результатами аналізу експериментальних досліджень, проведених за комбінаційними квадратами (латинськими або греко-латинськими), які розроблені на основі раціонального планування експериментів [19,59]. За цими квадратами комбінація зовнішніх незалежних чинників (факторів) зустрічається тільки один раз, тобто не повторюється.

Для аналізу результатів цих досліджень потрібно розробити відповідну методику обробки, результатом якої є створення багатофакторної емпіричної моделі. Для створення такої методики використані методи, які наведені в [19, 20, 21, 22]. Така обробка проводиться в декілька етапів з метою встановлення впливу чотирьох

незалежних факторів A, B, C і D , значення яких змінювались на чотирьох рівнях, на досліджуваний процес, зміна якого характеризується величиною Y .

Перший етап

На цьому етапі, який є спільним для методів, запропонованих в [19, 20, 21, 22], усереднюються результати по кожному незалежному чиннику і за цими даними, з використанням програми App.1, проводиться підбір емпіричних апроксимуючих “розумних” (гладких) кореляційних залежностей для кожного чинника.

Апроксимація вважається задовільною, якщо виконуються дві умови: $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}$, де σ_0 – середнє квадратичне відхилення значень частинної емпіричної залежності від експериментальних значень; $\bar{Y}$ – середнє значення функції за експериментальними значеннями, віднесеними до одного зовнішнього незалежного чинника, при постійних значеннях інших незалежних чинників планованого експерименту. Значення $\bar{Y}$ є постійним і не залежить від вибраного зовнішнього чинника [17].

За другою умовою довірна ймовірність P_d існування кореляційного зв’язку між вихідним параметром Y та вхідним змінним незалежним чинником повинна відповідати нерівності $P_d \geq 0,9$. Послідовність визначення P_d наступна: 1. За

формулою $T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}}$ визначається спостережене значення критерію Стюдента

$T_{СП}$. У формулі r_B – емпіричне значення вибіркового коефіцієнта кореляції між вихідним параметром Y та вхідним змінним незалежним чинником, n – об’єм вибірки; 2. За значенням $T_{СП}$ і числом степенів вільності k , яке визначається за формулою $k = n - 2$, по таблицях критичних точок розподілу Стюдента вибирається значення $t_{кр}(\alpha, k)$ за нерівністю $T_{СП} > t_{кр}$, α – рівень значущості. Значення α для виконання другої умови – $\alpha = 0,1; 0,05; 0,01; 0,02; 0,001$ для двосторонньої області прийняття рішення.

Якщо апроксимація експериментальних даних здійснюється поліномом другого степеня то емпіричне значення кореляції визначається за методикою, наведеною в

[15], за якою емпіричне значення коефіцієнта r_{HK} нелінійної кореляції визначається за формулою

$$r_{HK} = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y}, \quad (2.13)$$

де $\sigma_{y.f}$ – міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності; σ_y – середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями. Ці значення визначаються за наступними формулами

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\left(\sum (Y_{S.f.j} - \bar{Y}_{\bar{S}})^2\right) / n}, \quad (2.14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\sum (Y_{S.j} - \bar{Y}_{\bar{S}})^2\right) / n}. \quad (2.15)$$

В формулах (2.14) і (2.15) $Y_{S.f.j}$ – значення функції, обчислені за емпіричною залежністю між функцією Y і незалежним зовнішнім фактором S , $S=A, B, C, D$; $Y_{S.j}$ – експериментальні значення функції за зовнішнім чинником S ; $\bar{Y}_{\bar{S}}$ – середнє вибірки експериментальних значень функції.

Якщо для всіх частинних емпіричних залежностей умови задовільної апроксимації експериментальних даних підтверджені, слід переходити до останнього етапу методики – створення багатofакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції.

Якщо хоча б для одного чинника умови апроксимації не підтверджені, перейти до другого етапу методики.

Другий етап. Нейтралізація впливу незалежних чинників за методом Протодьяконова

Другий етап починається з нейтралізації впливу найбільш потужного незалежного чинника, який визначається за відношенням $Y_{\max} / Y_{\min}$ за умови задовільної апроксимації експериментальних даних рівнянням частинної емпіричної залежності, підібраної для цього чинника.

Для вибраного фактору визначається середнє значення вибірки чотирьох прийнятих рівнів, наприклад для фактору A – $\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^4 A_j}{4} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4}$. За рівнянням емпіричної залежності $Y_{A.f} = f(A)$ і за значенням $\bar{A}$ визначається

значення функції $Y_{\bar{A}}$. Перший варіант скорегованих вхідних даних визначається за формулою – $Y_{CK.1.i} = Y_i + (Y_{\bar{A}} - Y_{A.f.j}), i = 1...16, j = 1...4$.

За значеннями $Y_{CK.1.i}$ формується нова матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4x4, табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.1.i}$, одержані за методом

Протождяконова

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i + (Y_{\bar{A}} - Y_{A.f.j})$	$Y_{CK.1.i}$

Якщо за результатами нейтралізації найбільш впливового фактору на функцію Y , для трьох інших факторів результати апроксимації задовільні, то переходити до останнього етапу методики – створення багатофакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції. Якщо хоча б для одного чинника умови апроксимації не підтверджені, то за наведеною вище методикою, нейтралізується вплив найбільш потужного, з трьох інших факторів. Скореговані значення вхідних даних позначаються $Y_{CK.2}$.

Якщо при нейтралізації цього фактора хоча б для одного з двох інших умови апроксимації не підтверджені, то за наведеною вище методикою, нейтралізується вплив найбільш потужного, з двох останніх чинників. Скореговані значення вхідних даних позначаються $Y_{CK.3}$. Якщо і цьому випадку не вдалось підібрати задовільну апроксимуючу залежність для всіх чотирьох чинників, то потрібно перейти до третього етапу методики.

Третій етап. Нейтралізація впливу незалежних чинників за методом Яремійчука-Райхерта

Третій етап починається з нейтралізації впливу найбільш потужного незалежного чинника, визначеного за другим етапом методики.

Четвертий варіант скорегованих вхідних даних визначається за формулою

$$Y_{CK.4.i} = Y_i \cdot \frac{Y_{\bar{A}}}{\bar{Y}_{A.f.j}} \quad i = 1...16, j = 1...4.$$

За значеннями $Y_{CK.4i}$ формується нова матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4x4, табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.1.i}$, одержані за методом

Протодьяконова

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i \cdot \frac{Y_{\bar{A}}}{\bar{Y}_{A.f.j}}$	$Y_{CK.4i}$

Методика нейтралізації незалежних чинників експерименту за методом Яремійчука-Райхерта аналогічна методиці нейтралізації цих же чинників за методом Протодьяконова. Якщо за третім етапом не вдалось підібрати задовільну апроксимуючу залежність для всіх чотирьох чинників, то потрібно перейти до четвертого етапу методики.

**Четвертий етап. Підбір частинних емпіричних залежностей
прологарифмованими експериментальними даними**

Багатофакторну емпіричну модель нелінійної кореляції

$Y_M = f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$, шляхом логарифмування можна представити як суму логарифмів функцій $\lg Y_M = \lg f(A) + \lg f(B) + \lg f(C) + \lg f(D)$. За методикою, наведеною в [23], доказано, що якщо логарифми усереднюються по будь якому рівню незалежного зовнішнього чинника, то вплив інших зовнішніх незалежних чинників залишається незмінним при переході від одного до іншого рівня аналізованого чинника, тобто всі зміни усереднених логарифмів результатів експерименту $\lg Y_E$ будуть залежати тільки зміни аналізованого чинника. Такий же результат буде одержаний при усередненні логарифмів результатів експерименту на всіх рівнях інших незалежних зовнішніх чинників. За цими усередненими значеннями логарифмів визначаються їх усереднені антилогарифми $Alg \bar{Y}_{A1} \dots Alg \bar{Y}_{A4}, Alg \bar{Y}_{B1} \dots Alg \bar{Y}_{B4}, Alg \bar{Y}_{C1} \dots Alg \bar{Y}_{C4}$ і $Alg \bar{Y}_{D1} \dots Alg \bar{Y}_{D4}$.

За цими усередненими значеннями антилогарифмів, за програмним забезпеченням App.1 і “NUMERI”, підбирається такий вид емпіричної залежності, за якою їх апроксимація буде вважатися задовільною.

П'ятий етап. Встановлення, за частинними емпіричними залежностями(етапи 1-4) багатofакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції виду $Y_M = f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$

Якщо за експериментальними даними планованого дослідження проведені всі четверо етапів методики, то їх результатом будуть сім варіантів підбору емпіричних залежностей для всіх зовнішніх незалежних чинників.

Найкращим варіантом підбору вважається залежність, за якою довірча ймовірність кореляційного зв'язку між залежною змінною величиною Y і незалежним зовнішнім чинником більша за 0,95. Якщо таких залежностей декілька то приймається залежність з найбільшою величиною $\frac{0,1\bar{Y}_S}{\sigma_{0,S}}$, де S один із зовнішніх незалежних чинників A, B, C або D . Прологарифмовані вхідні дані використовуються тільки в тому випадку, коли за експериментальними і скорегованими даними хоча б для одного фактора не вдалось підібрати задовільну апроксимуючу емпіричну залежність.

Багатofакторна модель у вигляді добутку буде мати вигляд

$$Y_{M,i} = \bar{B} \cdot f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j).$$

У формулі моделі $\bar{B}$ – середнє значення постійної складової B_i , де i – порядковий номер дослідження експерименту, j – порядковий номер рівня незалежного фактору.

Значення коефіцієнта B_i , визначаються за формулою

$$B_i = \frac{Y_i}{f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)}, \quad (2.15)$$

де Y_i – експериментальні значення функції за даними, яка відповідає i -тому дослідженню; $f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослідження.

$$\text{Як приклад визначення значення } B_1 - B_1 = \frac{Y_1}{f(A_1) \cdot f(B_1) \cdot f(C_1) \cdot f(D_1)}.$$

2.3 Методика обробки результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин

Базовим варіантом при розробці цієї методики був прийнятий спосіб обробки аналогових записів проходки на долото, одержаних під час проведення стендових експериментальних досліджень на буровому верстаті (стенді) ІФНТУНГ [1,24,61]. В розділі 2.3 запропоновано варіант адаптації цього способу для аналізу результатів процесу буріння за даними закінчених 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; крутний момент ротора $T_{об.р}$, кН·м, частоту обертання ротора n_R , 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 при постійних параметрах бурового розчину.

Значення технологічних параметрів буріння закінченої свердловини у досліджуваному діапазоні її поглиблення рекомендується наводити у вигляді таблиць: за відсутності геологічних досліджень у табл. 2.4, за наявності результатів геологічних досліджень у табл. 2.5.

Таблиця 2.4 – Значення технологічних параметрів в аналізованому інтервалі буріння закінченої свердловини за її поглибленням

№	Глибина, м	Навантаження на долото F_D , тс	Крутний момент ротора $T_{OB.P}$, кН·м	Частота обертання ротора n_P , хв ⁻¹	Частота обертання долота n_D , хв ⁻¹	Механічна швидкість буріння V_{MEH} , м/год

Таблиця 2.5 – Значення технологічних параметрів в аналізованому інтервалі буріння закінченої свердловини за її поглибленням і результатами геологічних досліджень

№	Глибина, м	Навантаження на долото F_D , тс	Крутний момент ротора $T_{OB.P}$, кН·м	Частота обертання ротора n_P , хв ⁻¹	Частота обертання долота n_D , хв ⁻¹	Механічна швидкість буріння V_{MEH} , м/год.	Інтервал відбору шламу за ГЖ

Перший етап (варіант 1). Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за даними табл. 2.4

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 хвиликах, 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 [25], можна вважати “априорі” 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}

$$\Delta T_B = \frac{\Delta H_B}{\Delta V_{MEX}} = \frac{1\text{м}}{\Delta V_{MEX} (\text{м} / \text{год})} = \frac{1}{\Delta V_{MEX}} (\text{год}) = \frac{60}{\Delta V_{MEX}} (\text{хв}). \quad (2.16)$$

Значення інтервалу буріння, механічної швидкості і часу буріння для цього інтервалу подаємо у вигляді табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – 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. 2.7.

Таблиця 2.7 – 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
...	...	...	...	...	...
n					
Сума					

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i}}{\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n T_{B,i})^2}, \quad (2.17)$$

$$B = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n H_{B,i} - A \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \right). \quad (2.18)$$

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 [66]. 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 (2.17).

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 [26].

Одним із варіантів перевірки нульової гіпотези $H_0: A=0$ є метод однофакторного дисперсійного аналізу, який оперує з величинами, наведеними в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – 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			$\sum (H_{B,i} - H_{B,P,i})^2$	$\sum (H_{B,i} - \bar{H}_B)^2$	$\sum (H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$

В табл. 2.8 $H_{B,P,i}$ – 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 [26].

Емпіричне (спостережуване) значення коефіцієнта кореляції знаходимо за формулою

$$r_B^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n y_i \cdot x_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}. \quad (2.19)$$

Спостережуване значення критерію Стюдента

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}}. \quad (2.20)$$

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

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{C}{n-1}}. \quad (2.21)$$

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 програмне забезпечення App.2 в програмному забезпеченні Visual Studio на мові програмування “С#” (Сі Шарп) за допомогою фреймворку “Windows Form Application”, що дає можливість створювати програми для операційних систем Windows.

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 одна з умов лінійності емпіричного рівняння регресії не 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.

Перший етап (варіант 2). Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за даними табл. 2.5

Алгоритм виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за табл. 2.5 повністю відповідає алгоритму виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини за табл. 2.4 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. 2.9 наведено рівняння регресії лінійних ділянок і середні значення механічної швидкості для цих ділянок за рівнянням регресії і за інтервалом заглиблення свердловини.

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 .

Таблиця 2.9 – 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 $H_B = A \cdot T_B + B$	$\bar{V}_{mex}, \text{м / год}$	
			За рівнянням	За заглибленням

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

$$\bar{V}_{MEX} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX.i}}{n}, \quad (2.22)$$

$$D_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{MEX.i} - \bar{V}_{MEX})^2}{n-1}, \quad (2.23)$$

$$\sigma_V = \sqrt{D_V}. \quad (2.24)$$

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

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma_V \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}}, \quad (2.25)$$

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

$$R_v = \frac{\sigma_v}{\bar{V}_{\text{MEX}}} \cdot 100\%. \quad (2.26)$$

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 артефакту при менших значеннях рівня значущості, які можна приймати наступними 0,05; 0,02; 0,01; 0,002 і 0,001.

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 (2.22)-(2.24) і (2.26). Значення цих характеристик рекомендується наводити у відповідних таблицях.

Статистичні характеристики вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і результати визначення артефактів рекомендується наводити в табл. 2.10 і 2.11.

Таблиця 2.10 – 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.	$\bar{V}_{MEX},$ $м / год$	$D_V,$ $(м / год)^2$	$\sigma_V,$ $м / год$	$R_V,$ %

Таблиця 2.11 – 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	$R_V,$ %

Таблиця 2.12 – Статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото $F_{Дол.і}, тс$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n'	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{F}_{Дол.і}, тс$	$D_F,$ $(тс)^2$	$\sigma_F,$ $тс$	$R_F,$ %

Таблиця 2.13 – Статистичні характеристики вибірок частоти обертання долота $n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

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

Таблиця 2.14 – Статистичні характеристики вибірок крутного 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	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_p, \text{кН} \cdot \text{м}$ $T_{p.MIH} \dots T_{p.MAX}$	$D_T, (\text{кН} \cdot \text{м})^2$	$\sigma_T, \text{кН} \cdot \text{м}$	$R_T, \%$

Таблиця 2.15 – Визначення артефактів для вибірок значень крутного моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_p, \text{кН} \cdot \text{м}$ $T_{p.MIH} \dots T_{p.MAX}$	t_{kp}, α	Δ	$\bar{T}_p - \Delta, \bar{T}_p + \Delta$	$\bar{T}'_p, n'$ $T_{p.MIH} \dots T_{p.MAX}$	σ'_T	$R_T, \%$

Примітка: $\bar{V}'_{MEX}, D'_V, \sigma'_V, n'$ – статистичні характеристики і об'єми вибірок механічної швидкості без артефактів. При відсутності артефактів $\bar{V}'_{MEX} \equiv \bar{V}_{MEX}, D'_V \equiv D_V, \sigma'_V \equiv \sigma_V$.

Статистичні характеристики крутного моменту ротора визначаються за формулами (2.22)-(2.26) і наводяться у відповідних таблицях.

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 крутного 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 [26].

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

$$m_{1,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}}{n}, \quad (2.27)$$

$$m_{2,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^2}{n}, \quad (2.28)$$

$$m_{3,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^3}{n}, \quad (2.29)$$

$$m_{4,V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{MEX,i}^4}{n}. \quad (2.30)$$

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

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(m_{2,V} - m_{1,V}^2) \cdot n}{n-1}}. \quad (2.31)$$

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:

$$M_3 = m_{3,V} - 3m_{1,V} \cdot m_{2,V} + 2m_{1,V}^3; \quad (2.32)$$

$$A_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{MEX,i} - \bar{V}_{MEX})^3}{\sigma_V^3 \cdot n}, \text{ або } \frac{M_3}{\sigma_V^3}; \quad (2.33)$$

$$M_4 = m_{4,V} - 4m_{1,V} \cdot m_{3,V} + 6m_{1,V}^2 \cdot m_{2,V} - 3m_{1,V}^4; \quad (2.34)$$

$$E_V = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{MEX,i} - \bar{V}_{MEX})^4}{\sigma_V^4 \cdot n} - 3, \text{ або } \frac{M_4}{\sigma_V^4} - 3; \quad (2.35)$$

$$\sigma_{A,V} = \sqrt{\frac{6 \cdot (n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (2.36)$$

$$\sigma_{E,V} = \sqrt{\frac{24n \cdot (n-2)(n-3)}{(n-1)^2 (n+3)(n+5)}}. \quad (2.37)$$

Результати обчислень за формулами (2.27)-(2.36) рекомендується подавати у вигляді таблиці.

Таблиця 2.16 – Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $V_{\text{мех.і}}$ 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 дисперсій 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 [16],

$$F_{СП} = \frac{D_{X.j}}{D_{Y.k}}, D_{X.j} > D_{Y.k}. \quad (2.38)$$

У (2.38) 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

$$k_1 = n_X - 1; k_2 = n_Y - 1. \quad (2.39)$$

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 (2.38) і (2.39) рекомендується подавати у вигляді табл. 2.17.

Таблиця 2.17 – 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 [16]. Якщо $n_{X,j} \leq 30$ і $n_{Y,k} \leq 30$, то спостережне (емпіричне) значення статистичного критерію Стюдента визначається за формулою

$$T_{СП} = \frac{|\bar{x}_j - \bar{y}_k|}{\sqrt{(n_{X,j} - 1) \cdot D_{X,j} + (n_{Y,k} - 1) \cdot D_{Y,k}}} \sqrt{\frac{n_{X,j} \cdot n_{Y,k} (n_{X,j} + n_{Y,k} - 2)}{n_{X,j} + n_{Y,k}}}. \quad (2.40)$$

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

$$T_{СП} = \frac{|\bar{x}_j - \bar{y}_k|}{\sqrt{D_{X,j} / n_{X,j} + D_{Y,k} / n_{Y,k}}}. \quad (2.41)$$

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 (2.40) і (2.41) рекомендується подавати у вигляді табл. 2.18. За результатами перевірки закону розподілу і параметричних статистичних гіпотез про рівність дисперсій і середніх значень вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і параметрів режиму буріння виділяються всі лінійні ділянки, які належать до різних генеральних сукупностей.

Таблиця 2.18 – 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_C Π	F_K P	Нульова гіпотеза $M(X)_j = M(Y)_k$
	$\bar{x}_j$	$D_{X.j}$				
	$\bar{y}_k$	$D_{Y.k}$				

В табл. 2.19 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 2.19 – 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	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$\bar{F}_{ДОЛ}, \text{тс}$	$\bar{T}_P, \text{кН} \cdot \text{м}$	$T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$

Висновки до розділу 2

1. За розробленою програмою App.1 для десяти емпіричних рівнянь регресії методом найменших квадратів можна визначати коефіцієнти рівнянь і величину основної похибки апроксимації експериментальних даних цими рівняннями. Одночасно обчислюється емпіричне значення коефіцієнта кореляції за двома методиками, за якими визначається ймовірність існування вибраного емпіричного рівняння регресії.

2. Під час використання базового варіанту методики створення емпіричної багатофакторної моделі множинної нелінійної кореляції за даними, одержаними методом раціонального планування експерименту, виникла необхідність у розширенні області його застосування, а саме для експериментальних даних, за якими не можна підібрати гладку “розумну” криву, запропоновано визначати параметри частинних емпіричних залежностей за прологарифмованими експериментальними даними, які усереднені по кожному незалежному чиннику. Для апроксимації даних планованого експерименту частинними емпіричними залежностями в цьому випадку використовують антилогарифми середніх значень прологарифмованих експериментальних даних, за якими підбираються емпіричні частинні залежності.

3. 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 програмному забезпеченні Visual Studio на мові програмування “C#” (Сі Шарп) за допомогою фреймворку “Windows Form Application”, з використанням операційних систем Windows.

4. 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, крутний 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.

5. 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 та однаковими параметрами бурового розчину. Для цих ділянок статистичні характеристики вибірок дискретних значень технологічних параметрів повинні належати до однієї генеральної сукупності.

РОЗДІЛ 3

БАГАТОФАКТОРНІ ЕМПІРИЧНІ МОДЕЛІ МНОЖИННОЇ НЕЛІНІЙНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ

До параметрів крутного моменту на долоті відносимо інтегральний показник, а саме дисперсію процесу зміни крутного моменту D_T (розмірність $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$) і показники, які відносяться до внутрішньої структури процесу зміни моменту, а саме енергію низькочастотних і зубцевих коливань крутного моменту на долоті.

Для розуміння фізичного змісту енергії цих коливань наводимо витяг з [1], за яким для реєстрації крутного моменту на долоті використовують первинні здавачі, які на виході змінюють напругу U електричного сигналу залежно від зміни величини моменту.

Миттєве значення потужності електричного сигналу на виході

$$P_i^u = \frac{U_i^2}{R},$$

де U_i – дискретне значення електричного сигналу, мВ ; R – вхідний опір вимірювального тракту, Ом ; n – об'єм вибірки.

Оскільки процес зміни в часі крутного моменту на долоті є випадковою функцією, то для спрощення статистичних досліджень перейдемо до центрованих дискретних значень $\dot{U}_i$.

$$\dot{U}_i = U_i - \bar{U},$$

де $\bar{U}$ – середнє вибірки миттєвих значень $\{U_i\}$.

Математичне сподівання вибірки центрованих значень $\{\dot{U}_i\}$ рівне нулю.

Середнє значення потужності центрованого електричного сигналу складе

$$\bar{P}^u = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^u}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{U}_i^2}{R \cdot n}.$$

Перехід від дискретних значень центрованого електричного сигналу в мВ до миттєвих значень крутного моменту на долоті в $\text{Н} \cdot \text{м}$ здійснюємо за формулою

$$\dot{T}_{oi} = Z \cdot \dot{U}_i,$$

де Z – коефіцієнт переходу, що визначався за результатами тарування давача.

Дисперсія D_T вибірки миттєвих значень $\{\dot{T}_{di}\}$ визначається за формулою

$$D_T = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{T}_{di}^2}{n-1} = Z^2 \frac{\sum_{i=1}^n \dot{U}_i}{n-1} = Z^2 \frac{n \cdot R \cdot \bar{P}^u}{n-1}.$$

Оскільки величина $Z^2 \frac{n \cdot R}{n-1} = const$, то дисперсія вибірки центрованих миттєвих

значень крутного моменту на долоті та середнє значення потужності центрованого електричного сигналу мають однаковий фізичний зміст, то надалі замість фрази “дисперсія вибірки миттєвих значень крутного моменту на долоті” будемо використовувати вираз “потужність або енергія процесу зміни крутного моменту на долоті”, тобто приймаємо такі позначення $D_T \equiv E_T$.

Враховуючи вищесказане спектр внутрішньої структури процесу зміни моменту будемо називати енергетичним спектром, а ту частину загальної дисперсії, яка відноситься до низькочастотних і зубцевих коливань, відповідно енергією цих коливань $E_{нчк}$ і $E_{зк}$.

Для встановлення багатофакторних емпіричних моделей параметрів процесу зміни крутного моменту на долоті на буровому стенді ІФНТУНГ [1] проведені експериментальні дослідження з використанням методики раціонального планування експерименту.

За цією методикою комбінація значень незалежних зовнішніх чинників (факторів) $F_{ст}$, n_o , C , β зустрічалась тільки один раз. Кожний з чинників змінювався на чотирьох рівнях.

Під час проведення досліджень для зміни параметрів бурильного інструмента на використовувались пристрої, конструкція яких дозволяла змінювати значення жорсткості та коефіцієнта демпфування бурильного інструменту незалежно одне від одного [1].

Дослідження проводили у блоках пісковики воротищенської світи, які складені з двох пропластків, твердість яких за штампом $p_{ш}$ відповідно складала 1440 МПа і 2050 МПа.

Буріння вели долотом ІІІ-93Т-ЦА за постійної витрати бурового розчину (води), що становила 7м/с і забезпечувала повне очищення вибою від шламу [60].

За аналізом розмірностей багатфакторної залежності крутного моменту на долоті, наведених в [1], моментоемність (середнє значення крутного моменту на долоті) представлена функціональною залежністю

$$\begin{aligned}\bar{T}_d &= 0,0753 \cdot k_3 \cdot \left(\frac{F_{CT}}{1440 \cdot 10^6} \right)^{\alpha_9} \cdot \left(\frac{\omega_d}{8,7026} \right)^{-\alpha_{10}} \cdot \left(\frac{C}{1,3392 \cdot 10^8} \right)^{-\alpha_{11}} \cdot (a_1 - b_1 \beta) = \\ &= 1,26 \cdot 10^{17} \cdot k_3 \cdot F_{CT}^{\alpha_9} \cdot \omega_d^{-\alpha_{10}} \cdot C^{-\alpha_{11}} \cdot (a_1 - b_1 \beta).\end{aligned}$$

За цією залежністю представляємо багатфакторні емпіричні моделі інших параметрів крутного моменту також у вигляді добутку елементарних частинних залежностей для кожного зовнішнього незалежного чинника.

3.1 Багатфакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції загальної дисперсії $D_T(E_T)$ процесу зміни крутного моменту на долоті вигляду

$$E_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot M^2$$

В [2], за результатами експериментальних стендових досліджень, наведено підбір частинних емпіричних залежностей $\sigma_T = f(n)$; $\sigma_T = f(F_{CT})$; $\sigma_T = f(C)$ і $\sigma_T = f(\beta)$ (див. витяг з [2], табл.4 і 11).

Основним параметром досліджень є процес зміни стандартного квадратичного відхилення загальної енергії динамічної складової крутного моменту на долоті.

Таблиця 4[2] – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($p_{ui}=1440$ МПа)

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$
n, XB^{-1}	$\sigma_T = 21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n$	0,9951 0,99 < P < 0,998	0,098 < 2

F_{CT} , кН	$\sigma_T = 6,725 + 0,7518003 \cdot F$	0,9993 0,999<P<1	0,19<2
C , кН/м	$\sigma_T = 20,8125519 - 0,0033657 \cdot C +$ $+0,0000042 \cdot C^2 - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	P=1	$2,45 \cdot 10^{-14} < 2$
β , кН·с/м	$\sigma_T = 1 / 0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta$	0,9626 0,95<P<0,98	0,34<2

Таблиця 11[2] – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних ($p_{ui}=2050$ МПа)

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{\sigma}_T$
n , хв ⁻¹	$\sigma_T = n / 0,065293 \cdot n - 0,959192$	0,9999 0,999<P<1	0,14<1,72
F_{CT} , кН	$\sigma_T = 10,498 + 1,978314 \cdot 10^{-2} \cdot F^2$	0,9993 0,999<P<1	0,08<1,72
C , кН/м	$\sigma_T = 21,7714164 - 0,0153764 \cdot C +$ $+1,31 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 - 3,11283 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$	P=1	$3,32 \cdot 10^{-14} < 1,72$
β , кН·с/м	$\sigma_T = 18,694 - 0,2431 \cdot \beta +$ $+5,0699 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 - 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3$	P=1	$1,49 \cdot 10^{-13} < 1,72$

За цими залежностями емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції середнього квадратичного відхилення σ_T загальної дисперсії динамічної складової процесу зміни крутного моменту на долоті $D_T(E_T)$ для двох пропластків блоків воротищенської світи, твердістю за штампом $p_{ш}$ відповідно $p_{ш}=1440$ МПа і $p_{ш}=2050$ МПа мають наступний вигляд [2]:

для пропластка пісковику воротищенської світи твердістю 1440 МПа

$$\sigma_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 1,2891 \cdot 10^{-4} \cdot (21,832 - 1,133843 \cdot 10^{-2} \cdot n) \times \\ \times (6,725 + 0,7518003 \cdot F) \times (20,8125519 - 0,0033657 \cdot C + 0,0000042 \cdot C^2 - \\ - 1,30827 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times (1 / 0,04648 + 7,939979 \cdot 10^{-5} \cdot \beta), H \cdot m;$$

для пропластка пісковику воротищенської світи твердістю 2050 МПа

$$\sigma_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 1,9878 \cdot 10^{-4} \cdot (n / 0,065293 \cdot n - 0,959192) \times \\ \times (10,498 + 1,978314 \cdot 10^{-2} \cdot F^2) \times (21,7714164 - 0,0153764 \cdot C + 1,31 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 - \\ - 3,11283 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times (18,694 - 0,2431 \cdot \beta + 5,0699 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2 - 2,77 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^3), H \cdot m.$$

Результати досліджень, наведених в [2], не в повній мірі характеризують процес зміни загальної енергії динамічної складової. Це пояснюється тим, що при переході від σ_T до E_T за формулою $D_T = \sigma_T^2$, наведені вище залежності багатofакторних емпіричних моделей множинної нелінійної регресії не підтверджуються.

За наведеним вище матеріалом вираз “потужність або енергія процесу зміни крутного моменту на долоті”, можна застосовувати тільки для повної загальної енергії динамічної складової процесу зміни крутного моменту на долоті, використання цього виразу для похідної величини від загальної енергії, якою є середнє квадратичне відхилення, некоректне.

Для встановлення багатofакторних емпіричних залежностей $E_T = B_{CP} \cdot f(n_d) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$ проведено аналіз за експериментальними значеннями загальної енергії $D_T(E_T)$, які подано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – План чотирифакторного експерименту зі значеннями загальної енергії (дисперсії) E_T

№ досл.	Частота обертання n , хв^{-1}	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	E_T , $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$	
					$p_{ш, 1440\text{МПа}}$	$p_{ш, 2050\text{МПа}}$
1(17)	82	10	400	0,1	375,54	267,43
2(18)	82	15	2500	40	361,22	363,76
3(19)	82	20	800	70	386,48	343,28
4(20)	82	25	1700	90	653,42	564,6
5(21)	133	10	800	90	215,81	156,02
6(22)	133	15	1700	70	430,30	344,15
7(23)	133	20	400	40	458,27	277,93
8(24)	133	25	2500	0,1	581,11	550,69
9(25)	188	10	1700	40	188,58	161,8
10(26)	188	15	800	0,1	354,02	257,6
11(27)	188	20	2500	90	455,30	341,52
12(28)	188	25	400	70	648,27	503,6
13(29)	285	10	2500	70	84,24	105,34
14(30)	285	15	400	90	195,56	195,21
15(31)	285	20	1700	0,1	555,54	414,89
16(32)	285	25	800	40	755,1	544,3

Емпірична модель енергії $D_T(E_T)$ для пропластка твердістю 1440 МПа

Таблиця 3.2 – Експериментальні значення енергії E_T , усереднені за значеннями режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n , хв^{-1}	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	375,54	215,81	188,58	84,24	864,17	216,04
15	361,22	430,30	354,02	195,56	1341,1	335,28
20	386,48	458,27	455,30	555,54	1855,59	463,90
25	653,42	581,11	648,27	755,1	2637,9	659,48
Сума	1776,66	1685,49	1647,17	1590,44	6699,76	1674,7
Середнє	444,16	421,37	411,54	397,61	1674,68	418,67

Таблиця 3.3 – Експериментальні значення енергії E_T , усереднені за значеннями параметрів бурового інструменту

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	375,54	354,02	555,54	581,11	1866,21	466,55
40	458,27	755,1	188,58	361,22	1763,17	440,79
70	648,27	386,48	430,30	84,24	1549,29	387,32
90	195,56	215,81	653,42	455,30	1520,09	380,02
Сума	1677,64	1711,41	1827,84	1481,87	6699,76	1674,7
Середнє	419,41	427,85	456,96	370,47	1674,69	418,67

У табл. 3.2-3.3 подано результати з визначення енергії E_T , усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурового інструменту C і β .

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями енергії E_T процесу зміни крутного моменту на долоті і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 3.4.

У табл. 3.4 позначено: $P=1-\alpha$ – ймовірність існування кореляційної залежності між змінними факторами та величиною E_T , σ_0 – величина основної похибки у випадку заміни експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями, визначеними за програмою App.1 (розділ.2.1) і програмним забезпеченням для апроксимації даних поліномами 2 і 3-го ступенів.

За наведеним вище матеріалом ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між E_T та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками), а саме n , F_{CT} і β , більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими “розумними” кривими. Умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_T$ також виконується. Для чинника C апроксимація експериментальних даних проведена поліномом другого ступеня, ймовірність частинної залежності більша за 0,9.

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між загальною енергією процесу зміни крутного моменту та змінними чинниками експерименту.

$$E_{T,f} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (651,0205 \cdot n^{-0,08764}) \times \\ \times (106,69284 \cdot 1,076218^{F_{CT}}) \times (361,1582748 + 0,1475957 \cdot C - 0,000057 \cdot C^2) \times \\ \times (470,8029 - 1,04212 \cdot \beta), H^2 \cdot M^2. \quad (3.1)$$

У табл. 3.5 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{E_{Ti}}{f(F_i) \cdot f(n) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (3.2)$$

де E_{Ti} – експериментальні значення загальної енергії за даними табл. 3.1, яка відповідає i -тому дослід; $f(F_{CT,i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід, таблиці 3.4.

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$1,97236 \cdot 10^{-8}$	$1,58461 \cdot 10^{-8}$	$1,06989 \cdot 10^{-8}$	$1,30824 \cdot 10^{-8}$	$1,370761 \cdot 10^{-8}$	$1,77589 \cdot 10^{-8}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
B_i	$1,32134 \cdot 10^{-8}$	$1,1631 \cdot 10^{-8}$	$1,07362 \cdot 10^{-8}$	$1,28585 \cdot 10^{-8}$	$1,69336 \cdot 10^{-8}$	$1,43977 \cdot 10^{-8}$
№експ.	13	14	15	16		
B_i	$0,64203 \cdot 10^{-8}$	$0,98278 \cdot 10^{-8}$	$1,43459 \cdot 10^{-8}$	$1,49681 \cdot 10^{-8}$		

У табл. 3.6 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,3278 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{17/16} = 0,5913 \cdot 10^{-8}. \quad (3.3)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,1$ та числа ступенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів ($0,7597 \cdot 10^{-8}$; $1,9423 \cdot 10^{-8}$).

Таблиця 3.4 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_T$
n , ХВ ⁻¹	82		133	188	285	0,9952	0,99<P<0,998	1,9<41,9
	$E_{T.E}$	444,16	421,37	411,54	397,61			
	$E_{T.f} = 651,0205 \cdot n^{-0,08764}$							
	$E_{T.f}$	442,45	424,09	411,42	396,69			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9972	0,99<P<0,998	10,6<41,9
	$E_{T.E}$	216,04	335,28	463,9	659,48			
	$E_{T.f} = 106,69284 \cdot 1,076218^{F_{CT}}$							
	$E_{T.f}$	222,40	321,1	463,6	669,33			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9456	0,9<P<0,95	11,5<41,9
	$E_{T.E}$	419,41	427,85	456,96	370,47			
	$E_{T.f} = 361,1582748 + 0,1475957 \cdot C - 0,000057 \cdot C^2$							
	$E_{T.f}$	411,08	442,75	447,76	373,9			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9736	0,95<P<0,98	9,5<41,9
	466,55		440,79	387,32	380,02			
	$E_{T.f} = 470,8029 - 1,04212 \cdot \beta$							
	$E_{T.f}$	470,70	429,12	397,75	377,01			

Таблиця 3.6 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$1,351 \cdot 10^{-8}$	$1,0745 \cdot 10^{-17}$	$0,3278 \cdot 10^{-8}$	1,75 $\alpha=0,1$	$0,642 \cdot 10^{-8}$; $1,9724 \cdot 10^{-8}$	$1,3572 \cdot 10^{-8}$	$5,5554 \cdot 10^{-18}$	$0,2357 \cdot 10^{-8}$

Примітка: B'_{cp} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma}{R_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,2357}{1,3572} \cdot 100\% = 17,4\%. \quad (3.4)$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $1,3572 \cdot 10^{-8}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За зазначеним вище рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної кореляції визначається за експериментальними даними і буде мати вигляд

$$E_{T.M} = 1,3572 \cdot 10^{-8} \cdot (651,0205 \cdot n^{-0,08764}) \times (106,69284 \cdot 1,076218^{F_{CT}}) \times \\ \times (361,1582748 + 0,1475957 \cdot C - 0,000057 \cdot C^2) \times (470,8029 - 1,04212 \cdot \beta), H^2 \cdot m^2. \quad (3.5)$$

Таблиця 3.7 – Експериментальні значення загальної енергії процесу зміни крутного моменту і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне наванта- ження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компо- нування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компо- нування бурильного інструмента β , кН·с/м	$E_{T.E}$ $H^2 \cdot m^2$	$E_{T.M}$ $H^2 \cdot m^2$	ВП%
1	82	10	400	0,1	375,54	Не визн.	
2	82	15	2500	40	361,22	309,38	14,4
3	82	20	800	70	386,48	490,26	-26,8
4	82	25	1700	90	653,42	634,21	2,9
5	133	10	800	90	215,81	213,67	1,0
6	133	15	1700	70	430,30	328,85	23,6
7	133	20	400	40	458,27	470,72	-2,7

Продовження табл. 3.7

8	133	25	2500	0,1	581,11	678,04	-16,7
9	188	10	1700	40	188,58	238,39	-26,4
10	188	15	800	0,1	354,02	373,66	-5,5
11	188	20	2500	90	455,30	364,92	19,8
12	188	25	400	70	648,27	611,09	5,7
13	285	10	2500	70	84,24	Не визн.	
14	285	15	400	90	195,56	270,06	-38,1
15	285	20	1700	0,1	555,54	525,57	5,4
16	285	25	800	40	755,1	684,67	9,3

Середнє значення відносної похибки без відбракованих результатів першого і тринадцятого дослідів: $ВП_{CP}=14,2\%$.

Таблиця 3.8 – Експериментальні значення енергії E_T , усереднені за значеннями режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n_o , XB^{-1}	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	267	156	162	105	690	172,5
15	364	344	258	195	1161	290,25
20	343	278	342	415	1378	344,5
25	565	551	504	544	2164	541
Сума	1539	1329	1266	1259	5393	1348,25
Середнє	384,75	332,25	316,5	314,75	1348,25	337,0625

Таблиця 3.9 – Експериментальні значення енергії E_T , усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту

β , кН·с/м \ C , кН/м	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	267	258	415	551	1491	372,75
40	278	544	162	364	1348	337
70	504	343	344	105	1296	324
90	195	156	565	342	1258	314,5
Сума	1244	1301	1486	1362	5393	1348,25
Середнє	311	325,25	371,5	340,5	1348,25	337,0625

В табл. 3.7 наведено значення енергії $E_{T.M}$, визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту – $E_{T.E}$, знайденої за наступним рівнянням

$$ВП\% = \frac{E_{T.E} - E_{T.M}}{E_{T.E}} \cdot 100. \quad (3.6)$$

Емпірична модель енергії $D_T(E_T)$ для пропластка твердістю 2050 МПа

У табл. 3.8, 3.9 подано результати з визначення енергії E_T , усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

У таблиці 3.10 подано усереднені експериментальні значення енергії $E_{T.E}$ і значення, визначені за емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей $E_{T.f}$.

За таблицею 3.10 умови задовільної апроксимації експериментальних даних підібраними емпіричними залежностями виконуються.

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між загальною енергією процесу зміни крутного моменту та змінними чинниками експерименту для пропластка пісковики воротищенської світи твердістю 2050 МПа.

$$\begin{aligned} E_{T.f} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (n / 0,003401 \cdot n - 0,05683) \times \\ \times (88,14799 \cdot e^{0,07201 \cdot F_{CT}}) \times (263,1212914 + 0,1189463 \cdot C - 0,0000348 \cdot C^2) \times \\ \times (375,2453 - 6,2354 \cdot \sqrt{\beta}), H^2 \cdot M^2. \end{aligned} \quad (3.7)$$

У табл. 3.11 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою (3.2), де E_{T_i} – експериментальні значення загальної енергії за даними табл.3.1, які відповідають дослідом 17-32; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам дослідом 17-32, табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Підбір частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями енергії E_T та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних, $p_u=2050$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_T$
n , хВ ⁻¹	82		133	188	285	0,9952	0,999<P<1,0	10,0<33,7
	$E_{T.E}$	384,75	332,25	316,5	314,75			
	$E_{T.f} = n / 0,003401 \cdot n - 0,05683$							
	$E_{T.f}$	369,28	336,28	322,71	312,34			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9972	0,98<P<0,99	24,7<33,7
	$E_{T.E}$	172,5	290,25	344,5	541			
	$E_{T.f} = 88,14799 \cdot e^{0,07201 \cdot F_{CT}}$							
	$E_{T.f}$	181,11	259,61	372,12	533,4			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9508 0,95<P<0,98	0,95<P<0,98	8,1<33,7
	$E_{T.E}$	311	325,25	371,5	340,5			
	$E_{T.f} = 263,1212914 + 0,1189463 \cdot C - 0,0000348 \cdot C^2$							
	$E_{T.f}$	305,13	336,01	364,76	342,99			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9987	0,998<P<0,999	1,3<33,7
	$E_{T.E}$	372,75	337	324	314,5			
	$E_{T.f} = 375,2453 - 6,2354 \cdot \sqrt{\beta}$							
	$E_{T.f}$	373,27	335,81	323,08	316,09			

Таблиця 3.11 – Значення коефіцієнта B_i для дослідів 17-32 планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	$3,51078 \cdot 10^{-8}$	$3,29430 \cdot 10^{-8}$	$2,30116 \cdot 10^{-8}$	$2,48607 \cdot 10^{-8}$	$2,41198 \cdot 10^{-8}$	$3,34509 \cdot 10^{-8}$
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	$2,16757 \cdot 10^{-8}$	$2,3980 \cdot 10^{-8}$	$2,26007 \cdot 10^{-8}$	$2,45153 \cdot 10^{-8}$	$2,62318 \cdot 10^{-8}$	$2,96774 \cdot 10^{-8}$
№експ.	29	30	31	32		
B_i	$1,68047 \cdot 10^{-8}$	$2,49607 \cdot 10^{-8}$	$2,62175 \cdot 10^{-8}$	$2,89542 \cdot 10^{-8}$		

У табл. 3.12 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

Таблиця 3.12 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$2,6194 \cdot 10^{-8}$	$0,2296 \cdot 10^{-16}$	$0,4791 \cdot 10^{-8}$	1,75 $\alpha=0,1$	$3,51078 \cdot 10^{-8}$; $1,6804 \cdot 10^{-8}$	$2,6229 \cdot 10^{-8}$	$0,1359 \cdot 10^{-16}$	$0,3687 \cdot 10^{-8}$

Примітка: B'_{cp} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Значення Δ обчислюється за формулою (3.8) і за цим значенням межі інтервалу визначення артефактів – $1,75517 \cdot 10^{-8}$ - $3,48363 \cdot 10^{-8}$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,4791 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{17/16} = 0,8642 \cdot 10^{-8}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнт варіації за формулою (3.4) – $K_{BAP} = 14,1\%$.

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $2,6229 \cdot 10^{-8}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За зазначеним вище рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної кореляції визначається за експериментальними даними і буде мати вигляд

$$E_{T.M} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 2,6229 \cdot 10^{-8} \cdot (n / 0,003401 \cdot n - 0,05683) \times \\ \times (88,14799 \cdot e^{0,07201 \cdot F_{CT}}) \times (263,1212914 + 0,1189463 \cdot C - 0,0000348 \cdot C^2) \times \\ \times (375,2453 - 6,2354 \cdot \sqrt{\beta}), H^2 \cdot M^2. \quad (3.9)$$

В таблиці 3.13 наведено значення енергії, визначені за рівнянням багатфакторної моделі $E_{T.M}$, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів $E_{T.E}$, обчисленої за рівнянням (3.6).

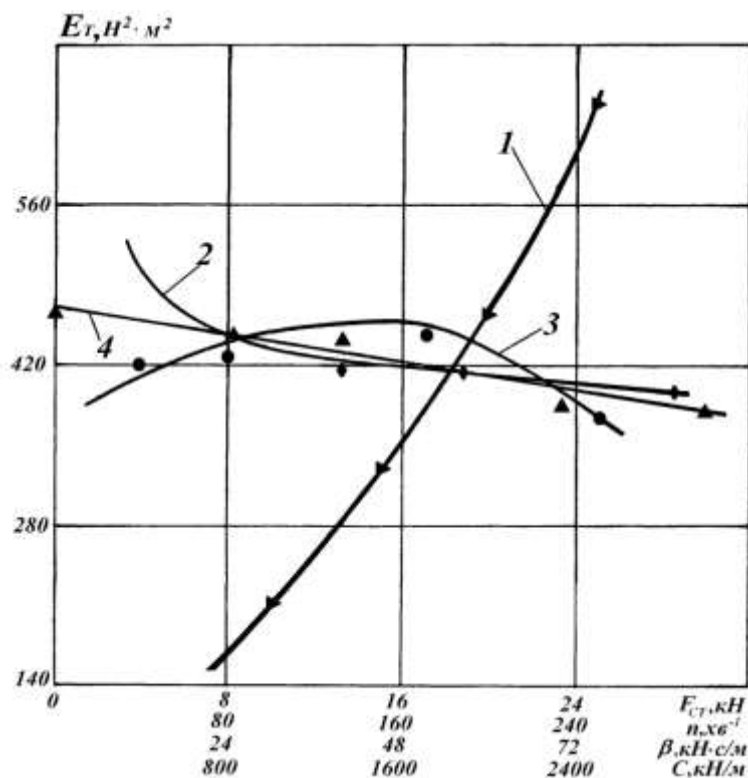
Таблиця 3.13 – Експериментальні значення загальної енергії процесу зміни крутного моменту і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, $p_{ш}=2050$ МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне наванта- ження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	$E_{T.E}$ $H^2 \cdot м^2$	$E_{T.M}$ $H^2 \cdot м^2$	ВП%
17	82	10	400	0,1	267,43	Не визн.	
18	82	15	2500	40	363,76	289,59	20,4
19	82	20	800	70	343,28	391,23	-14,0
20	82	25	1700	90	564,6	595,61	-5,5
21	133	10	800	90	156,02	169,64	-8,7
22	133	15	1700	70	344,15	269,82	21,6
23	133	20	400	40	277,93	336,28	-21
24	133	25	2500	0,1	550,69	602,27	-9,4
25	188	10	1700	40	161,8	187,75	-16
26	188	15	800	0,1	257,6	275,58	-7
27	188	20	2500	90	341,52	341,44	0
28	188	25	400	70	503,6	445,03	11,6
29	285	10	2500	70	105,34	Не визн.	
30	285	15	400	90	195,21	205,11	-5,1
31	285	20	1700	0,1	414,89	415,02	0
32	285	25	800	40	544,3	493,01	9,4

Середнє значення відносної похибки без відбракованих результатів сімнадцятого і двадцять дев'ятого дослідів: $ВП_{CP}=10,7\%$.

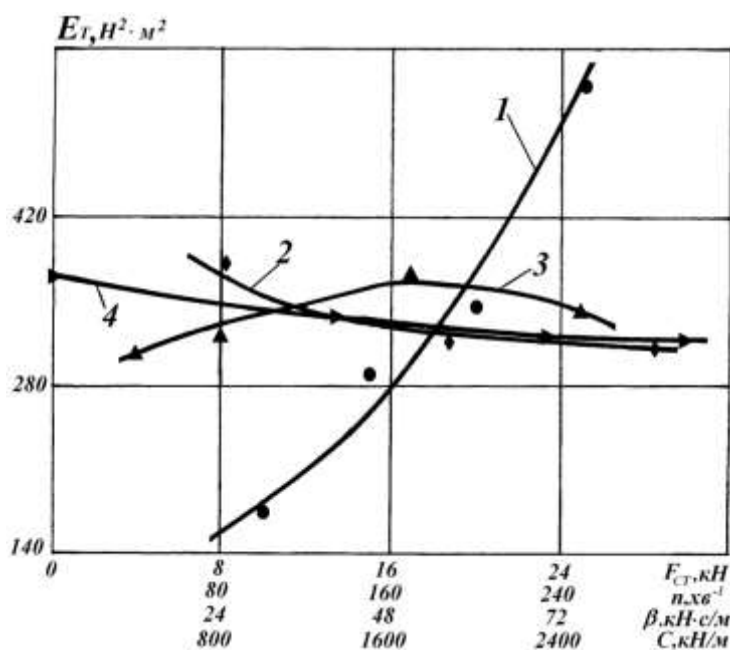
На рис. 3.1 і 3.2 наведено графіки частинних емпіричних залежностей, побудовані за відповідно даними табл. 3.4 і 3.10.

За наведеним вище матеріалом із збільшенням твердості породи за всіма частинними залежностями $E_{T.f} = f(F_{CT})$, $E_{T.f} = f(n)$, $E_{T.f} = f(C)$ і $E_{T.f} = f(\beta)$ енергія процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується саме через вплив твердості породи. Враховуючи це доцільно графічно представити ці залежності для порід різної твердості.



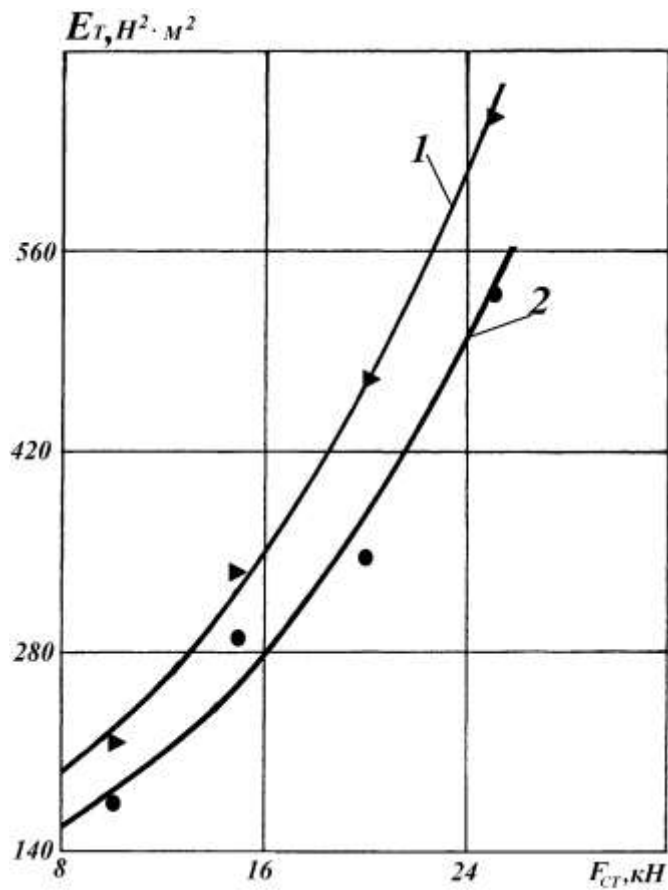
1(►) – $E_T = f(F_{CT})$; 2(◆) – $E_T = f(n)$; 3(●) – $E_T = f(C)$; 4(▲) – $E_T = f(\beta)$

Рисунок 3.1 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, $p_{ш}=1440\text{МПа}$



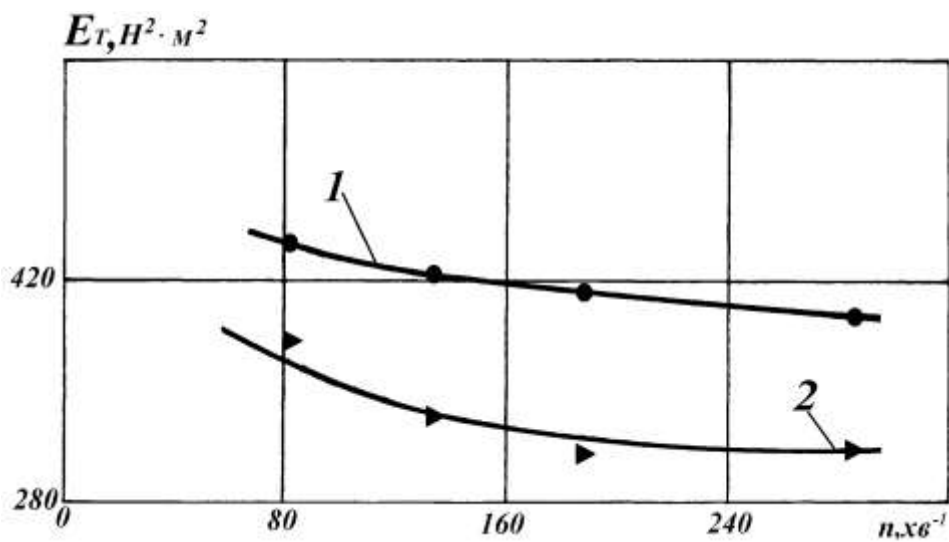
1(●) – $E_T = f(F_{CT})$; 2(◆) – $E_T = f(n)$; 3(▲) – $E_T = f(C)$; 4(►) – $E_T = f(\beta)$

Рисунок 3.2 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, $p_{ш}=2050\text{МПа}$



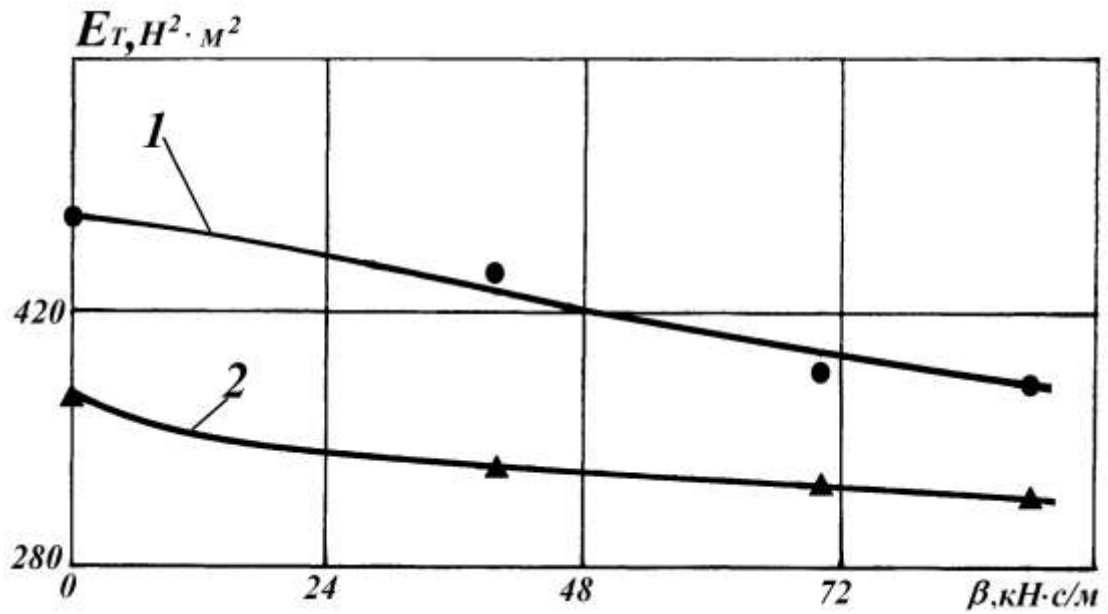
1(►) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.3 – Графіки частинних залежностей $E_{T,f} = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



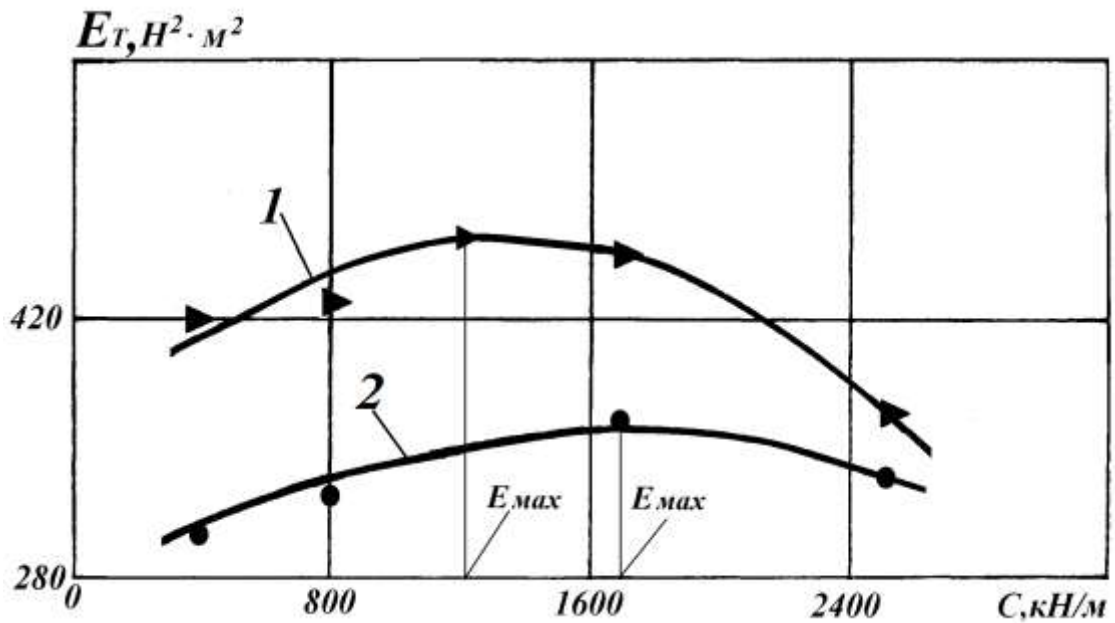
1(●) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(►) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.4 – Графіки частинних залежностей $E_{T,f} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(●) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(▲) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.5 – Графіки частинних залежностей $E_{T.f} = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(♦) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.6 – Графіки частинних залежностей $E_{T.f} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

Під час аналізу емпіричних частинних залежностей $E_{T,f} = f(n)$, $E_{T,f} = f(C)$ і $E_{T,f} = f(\beta)$ важливо одержати підтвердження того, що різниця між значеннями енергії, обчисленої за цими залежностями, виникає тільки внаслідок зміни зовнішнього незалежного чинника, а не в результаті похибок, допущених під час обробки даних експерименту. Врахувати вплив випадкової похибки на результати експерименту можна тільки за допомогою методів математичної статистики, які передбачають наявність вибірки значень фізичної величини.

Істинне значення величини x на практиці застосувати неможливо, так як його не можна визначити. Для практичних розрахунків замість значення X_{ict} приймають середнє значення $\bar{X}$ вибірки значень величини X а за дійсні значення, значення вибірки. Для частинних залежностей планового експерименту пропонується утворити таку вибірку з трьох значень: експериментального, обчисленого за формулою емпіричної залежності і за середнім для двох вище названих значень.

Довірчу ймовірність приймають при дослідженнях процесу буріння нафтових і газових свердловин з наступного ряду: 0,8; 0,9; 0,95. При попередніх випробуваннях бурової техніки, до яких можна віднести дослідження за плановим експериментом, довірчу ймовірність рекомендується приймати 0,8 [5].

В додатку Е наведено методику і визначення довірчих інтервалів середніх значень таких вибірок.

Частинні емпіричні залежності $E_{T,f} = f(F_{CT})$, рис. 3.3, для обох пропластків – монотонно зростаючі, тобто при зміні статичного осьового навантаження на долото в інтервалі 10-25 кН енергія E_T процесу зміни крутного моменту на долоті зростає. Це збільшення є наслідком впливу осьового статичного навантаження на долото тільки при підтвердженні нерівності $E_{T,f,MAX,i} < E_{T,f,MIN,i+1}$, $i = 1 \dots 4$. За нерівністю $E_{T,f,MAX,i}$ – максимальне значення довірчого інтервалу для i -того рівня навантаження, наприклад рівню $i=1$ відповідає навантаження $F_{CT}=10$ кН, $E_{T,f,MIN,i+1}$ – мінімальне значення довірчого інтервалу для наступного рівня $i=1+1=2$ і це відповідає навантаженню $F_{CT}=15$ кН і т.д.

При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.1, за 90% довірчими інтервалами одержані нерівності $227,84 < 309,4$; $332,79 < 463,35$ і $463,85 < 660,96$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу осьового навантаження на загальну енергію процесу зміни крутного моменту на долоті. Аналогічний висновок можна зробити і за 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.2.

Вплив твердості породи на величину загальної енергії можна оцінити за нерівністю $E_{T.f.MIN.1440.i} > E_{T.f.MAX.2050.i}$, $i = 1 \dots 4$, де $E_{T.f.MIN.1440.i}$ – мінімальне значення довірчого інтервалу i -того рівня осьового навантаження, одержане при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, $E_{T.f.MAX.2050.i}$ – максимальне значення довірчого інтервалу i -того рівня осьового навантаження, одержане при бурінні в породі твердістю 2050 МПа. Якщо нерівність підтверджується, то різні значення E_T – це наслідок впливу твердості гірської породи. За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.1 і Е.2, з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи загальна енергія процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

Частинні емпіричні залежності $E_T = f(n)$, рис. 3.4, для обох пропластків – монотонно спадаючі, тобто із при зміні частоти обертання долота від 82 до 285 хв⁻¹ енергія E_T процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується. Це зменшення є наслідком впливу частоти обертання долота тільки при підтвердженні нерівності $E_{T.f.MIN.i} > E_{T.f.MAX.i+1}$, $i = 1 \dots 4$. За нерівністю $E_{T.f.MIN.i}$, це мінімальне значення довірчого інтервалу для i -того рівня частоти обертання, наприклад рівню $i=1$ відповідає частота $n=82$ хв⁻¹, $E_{T.f.MAX.i+1}$, максимальне значення довірчого інтервалу для наступного рівня $i=1+1=2$, $n=133$ хв⁻¹ і т.д. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.3, за 90% довірчими інтервалами одержані нерівності $441,01 > 426,39$; $421,79 > 411,52$ і $411,32 > 397,48$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу частоти обертання на загальну енергію процесу зміни крутного моменту на долоті.

Аналогічний висновок можна зробити і за 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.4.

Оцінка впливу твердості породи на величину загальної енергії за частинними емпіричними залежностями $E_T = f(n)$ аналогічна оцінці за залежностями $E_{T.f} = f(F_{CT})$. За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.3 і Е.4, одержані нерівності $441,01 > 382,05$; $421,79 > 339,7$; $411,32 > 328$ і $395,9 > 314,6$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи загальна енергія процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

Частинні емпіричні залежності $E_T = f(\beta)$, рис. 3.5, для обох пропластків – монотонно спадаючі, тобто із збільшенням коефіцієнту демпфування енергія E_T процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується. За наведеним вище матеріалом це зменшення є наслідком впливу коефіцієнту демпфування тільки при підтвердженні нерівності $E_{T.f.MIH.i} > E_{T.MAX.i+1}$, $i = 1 \dots 4$. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.5, за 90% довірчими інтервалами одержані нерівності $467,19 > 438,82$; $419,41 > 406,66$; $411,32 > 328$ і $388,54 > 379,54$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу коефіцієнту демпфування на загальну енергію процесу зміни крутного моменту на долоті. Аналогічний висновок можна зробити і за 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.6.

Оцінка впливу твердості породи на величину загальної енергії за частинними емпіричними залежностями $E_T = f(\beta)$ аналогічна оцінці за залежностями $E_{T.f} = f(F_{CT})$ і $E_T = f(n)$. За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.5 і Е.6, одержані нерівності $467,19 > 373,71$; $419,41 > 336,81$; $388,84 > 323,85$ і $374,48 > 317,43$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи загальна енергія процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

Емпіричні частинні залежності $E_{T.f} = f(F_{CT})$, $E_T = f(n)$ і $E_T = f(\beta)$ описуються гладкими «розумними» кривими, за якими локальні екстремуми (максимуми та мінімуми) відсутні.

Частинні емпіричні залежності $E_{T.f} = f(C)$, рис.3.6, для гірської породи твердістю 1440 і 2050 МПа представлені поліномами поліноми другого степеня. Особливістю таких залежностей є наявність локального максимуму, який розділяє

графік залежності на дві криволінійні ділянки. Перша монотонно зростаюча ділянка – це частина графіка від значення $E_{T.f}$, визначеного для першого рівня жорсткості – $C=400$ кН/м, до значення локального максимуму $E_{T.MAX.f}$, друга монотонно спадаюча ділянка – від значення локального максимуму до значення $E_{T.f}$, визначеного для четвертого рівня жорсткості – $C=2500$ кН/м. За цим вплив жорсткості на загальну енергію для першої ділянки підтверджується нерівністю $E_{T.f.MAX.i} < E_{T.MIN.i+1}$, для другої ділянки - нерівністю $E_{T.f.MIN.i} > E_{T.MAX.i+1}$.

При бурінні в породі твердістю 1440 МПа зафіксований локальний максимум $E_{T.MAX.f} = 456,7 H^2 \cdot m^2$, при $C = 1295 \text{ кН / м}$, за цим для першої ділянки виділяємо три рівні жорсткості: 400, 800 і 1295 кН/м. За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.7, одержані нерівності $418,03 < 429,98$; **$455,52,79 > 446,73$** . Нерівність $E_{T.f.MAX.i} < E_{T.MIN.i+1}$ не підтверджена для діапазону жорсткості 800-1295 кН/м, в якому різниця між значеннями енергії пояснюється випадковою похибкою. За цим вплив жорсткості на величину $E_{T.f}$ спостерігається при її збільшенні в інтервалі від 400 до 1295 кН/м. При подальшому зростанні жорсткості в інтервалі 1295 до 2500 кН/м, за 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.7, зменшення величини $E_{T.f}$ – це наслідок збільшення жорсткості компонування бурильного інструменту. За додатком Е 90% довірчому інтервалу локального максимуму 446,73-466,67 (Н·м)² відповідає інтервал жорсткості 1154-1436 кН/м.

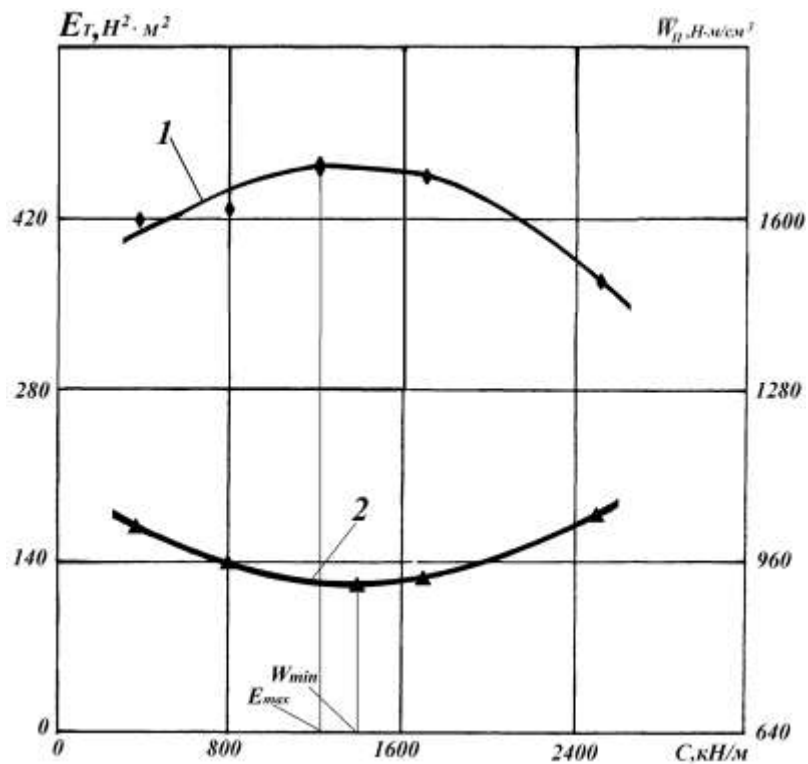
При бурінні в породі твердістю 2050 МПа зафіксований локальний максимум $E_{T.MAX.f} = 364,76 H^2 \cdot m^2$, при $C = 1709 \approx 1700 \text{ кН / м}$, тобто значення жорсткості, за якою визначений локальний максимум, практично, співпадає з зовнішнім рівнем зміни жорсткості. За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.8, одержані нерівності $310,03 < 326,79$; $345,23 < 359,13$, тобто для інтервалу жорсткості 400-1700 кН/м нерівність $E_{T.f.MAX.i} < E_{T.MIN.i+1}$ підтверджена., для інтервалу 1700-2500 кН/м нерівність $E_{T.f.MIN.i} > E_{T.MAX.i+1}$ підтверджена, $358,13 > 354,09$. За додатком Е 90%

довірчому інтервалу локального максимуму $359,13-370,39 \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2$ відповідає інтервал жорсткості $1524-1876 \text{ кН/м}$.

Оцінка впливу твердості породи на величину загальної енергії за частинними емпіричними залежностями $E_T = f(C)$ аналогічна оцінці за залежностями $E_{T.f} = f(F_{CT})$, $E_T = f(n)$ і $E_T = f(\beta)$, тобто з ймовірністю $0,9$ можна стверджувати що із збільшенням твердості породи загальна енергія процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

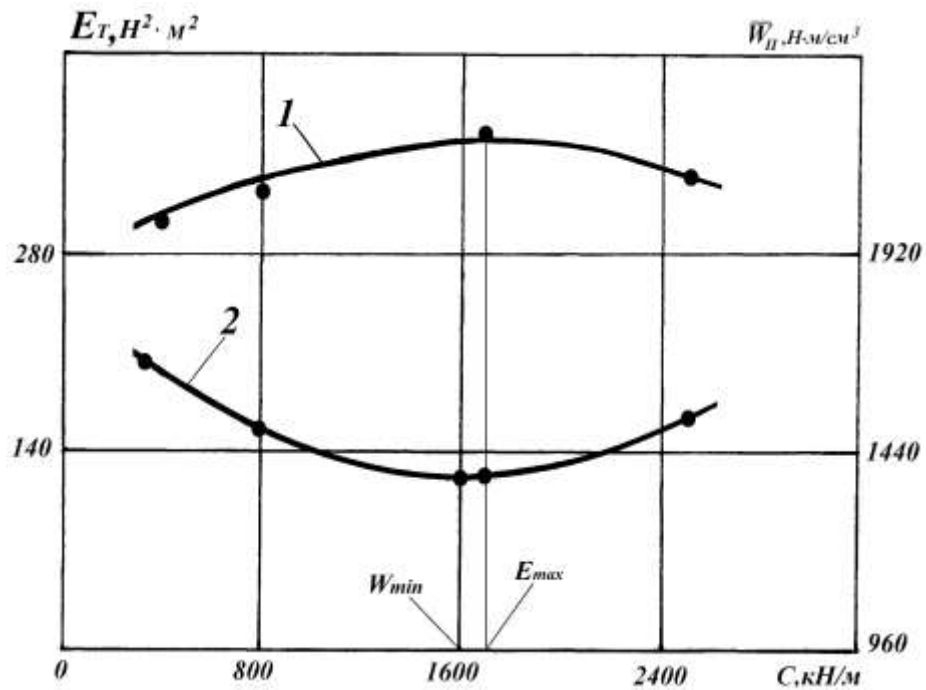
Більш інформативним матеріалом під час аналізу процесу зміни загальної енергії динамічної складової крутного моменту на долоті є варіант співставлення залежностей $E_{T.f} = f(C)$ і залежностей $\bar{W}_{\Pi.f} = f(C)$, де $\bar{W}_{\Pi}$ – енергоємність процесу руйнування гірської породи, значення якої наведено в [1]. На рис. 3.7 і 3.8 зображено графіки цих частинних залежностей для породи твердістю відповідно 1440 і 2050 МПа .

За рис. 3.7 для породи твердістю 1440 МПа максимум енергії $456,07 \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2$ зафіксований для жорсткості 1295 кН/м . 90% довірчому інтервалові цього максимуму відповідає інтервал жорсткості: $1154-1436 \text{ кН/м}$. В цьому ж інтервалі знаходиться і мінімум енергоємності процесу руйнування гірської породи $\bar{W}_{\Pi} = 920 \text{ Н}\cdot\text{м} / \text{см}^3$, який зафіксований для жорсткості $C=1375 \text{ кН/м}$. За цим значення жорсткості 1295 кН/м і 1375 кН/м , практично, співпадають, так як за 90% довірчим інтервалом знаходяться в межах випадкової похибки.



$$1 - E_{T.f} = f(C); 2 - \bar{W}_{II.f} = f(C);$$

Рисунок 3.7 – Графіки частинних залежностей $E_{T.f} = f(C)$ і $\bar{W}_{II.f} = f(C)$, одержані методом планованого експерименту, пропласток твердістю 1440 МПа



$$1 - E_{T.f} = f(C); 2 - \bar{W}_{II.f} = f(C);$$

Рисунок 3.8 – Графіки частинних залежностей $E_{T.f} = f(C)$ і $\bar{W}_{II.f} = f(C)$, одержані методом планованого експерименту, пропласток твердістю 2050 МПа

За рис. 3.8 спостерігається максимум енергії процесу зміни крутного моменту $363,96 \text{ (Н}\cdot\text{м)}^2$, зафіксований для жорсткості $C \approx 1700 \text{ кН/м}$. 90% довірчому інтервалові цього максимуму відповідає інтервал жорсткості: 1524-1876 кН/м. Мінімум енергоємності процесу руйнування гірської породи $\bar{W}_n = 1380 \text{ Н}\cdot\text{м} / \text{см}^3$ зафіксований для жорсткості $C = 1602 \text{ кН/м}$. За цим значення жорсткості 1700 кН/м і 1602 кН/м, практично, співпадають, так як за 90% довірчим інтервалом знаходяться в межах випадкової похибки.

За сказаним вище, з ймовірністю 0,9, можна стверджувати що максимум загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті та мінімум енергоємності незалежно від твердості породи, практично, зафіксовані для одного і того ж значення жорсткості компонування бурильного інструмента.

Сучасні бурові установки оснащені пультом бурильника, який дозволяє крім контролю за процесом буріння, фіксувати всі параметри цього процесу на електронних носіях.

За результатами аналізу процесу зміни цих параметрів можна встановити мінімум енергоємності процесу руйнування гірської породи і при наявності даних про параметри компоновки низу бурильної колони можна встановити їх величину, яка відповідає цьому мінімуму. За цим можна розробляти рекомендації по підборі параметрів компоновки низу бурильної колони, які можуть забезпечити мінімум енергоємності процесу руйнування гірської породи.

3.2 Багатофакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції енергії низькочастотних коливань $E_{нчк}$ процесу зміни крутного моменту на долоті

$$\text{вигляду } E_{нчк} = B_{ср} \cdot f(n) \cdot f(F_{ст}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$$

За даними експериментальних досліджень [6, 7, 8] поздовжні коливання корпусу тришарошкового долота, як правило, двохкомпонентні, виділяють низькочастотні і зубцеві складові. Низькочастотні коливання тришарошкового долота виникають під час перекочування шарошок як гладких конусів по вибою свердловини.

Якщо на поверхні вибою не утворюються три горби, а на вибої спостерігається зубчаста рейка [6], то можливі теоретичні значення низькочастотних коливань визначаються за формулою

$$f_H = \frac{N \cdot n}{60} k, \text{Гц} \quad (3.10)$$

де N – число шарошок долота, які знаходяться в контакті з вибоєм, $N=1,2$ і 3 ; n – частота обертання долота, хв^{-1} ; k – коефіцієнт кратності до числа шарошок $N=3$, $k=1, 2, 3$ [6].

Аналіз спектральної щільності [7] вказує на те, що енергетичний максимум, в основному, приходить на першу гармоніку низькочастотних коливань долота. В табл. 3.24 наведено теоретичні значення низькочастотних коливань, обчислені за формулою (3.10) за різних значень N , n і k .

Таблиця 3.14 – Теоретичні значення низькочастотних коливань

$n, \text{хв}^{-1}$	N	i	N	i	N	i	N	i	N	i
82	1	1	2	1	3	1	3	2	3	3
$f_{HЧК}, \text{Гц}$	1,37		2,73		4,1		8,2		12,3	
133	1	1	2	1	3	1	3	2	3	3
$f_{HЧК}, \text{Гц}$	2,22		4,43		6,65		13,3		19,95	
188	1	1	2	1	3	1	3	2	3	3
$f_{HЧК}, \text{Гц}$	3,13		6,27		9,4		18,8		28,2	
285	1	1	2	1	3	1	3	2	3	3
$f_{HЧК}, \text{Гц}$	4,75		9,5		14,25		28,5		42,75	

Матрицю планованого експерименту зі значеннями енергії (дисперсії) низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту подано в табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – План чотирифакторного експерименту

№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне навантаження на долото $F_{СТ}, \text{кН}$	Жорсткість компо- нування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компо- нування бурильного інструмента $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$E_{HЧК},$ $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$	
					$p_{ш},$ 1440МПа	$p_{ш},$ 2050МПа
1(17)	82	10	400	0,1	36,092	11,121
2(18)	82	15	2500	40	23,595	6,856

3(19)	82	20	800	70	31,256	15,342
4(20)	82	25	1700	90	36,844	25,07
5(21)	133	10	800	90	9,345	8,884
6(22)	133	15	1700	70	16,177	9,176
7(23)	133	20	400	40	17,222	17,222
8(24)	133	25	2500	0,1	29,194	29,194
9(25)	188	10	1700	40	6,489	5,534
10(26)	188	15	800	0,1	11,36	7,789
11(27)	188	20	2500	90	15,231	14,328
12(28)	188	25	400	70	32,27	25,502
13(29)	285	10	2500	70	3,081	5,522
14(30)	285	15	400	90	9,116	9,067
15(31)	285	20	1700	0,1	19,357	14,884
16(32)	285	25	800	40	27,449	27,449

3.2.1 Емпірична модель енергії (дисперсії) низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 1440 МПа

У табл. 3.16-3.17 подано експериментальні значення енергії $E_{HЧК}$, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями енергії $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту на долоті і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 3.18.

Таблиця 3.16 – Експериментальні значення енергії $E_{HЧК}$, усереднені за значеннями режимних параметрів, $p_w=1440$ МПа

$F_{CT}, \text{кН} \backslash n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	36,092	9,345	6,489	3,081	55,007	13,752
15	23,595	16,177	11,36	9,116	60,248	15,062
20	31,256	17,222	15,231	19,357	83,066	20,766
25	36,844	29,194	32,27	27,449	125,757	31,439
Сума	127,787	71,938	65,35	59,003	324,078	
Середнє	31,947	17,984	16,338	14,751		

Таблиця 3.17 – Експериментальні значення енергії $E_{HЧК}$, усереднені за значеннями параметрів бурового інструменту, $p_{ui}=1440$ МПа

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	36,092	11,36	19,357	29,194	96,003	24,001
40	17,222	27,449	6,489	23,595	74,755	18,689
70	32,27	31,256	16,177	3,081	82,784	20,696
90	9,116	9,345	36,844	15,231	70,536	17,634
Сума	94,7	79,41	78,867	71,101	324,078	
Середнє	23,675	19,852	19,717	17,775		

За табл. 3.17 умови задовільної апроксимації експериментальних даних підібраними емпіричними залежностями виконуються. Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між енергією $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту та змінними чинниками експерименту

$$E_{HЧК} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (n / 0,0817874 \cdot n - 3,88259) \times \\ \times (1 / -0,00281927 \cdot F_{CT} + 0,104105) \times (2849,816604 / C + 17,020136) \times \\ \times (22,06057 \cdot \beta^{-0,036446}), H^2 \cdot M^2. \quad (3.11)$$

У табл. 3.19 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{E_{HЧКi}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (3.12)$$

де $E_{HЧКi}$ – експериментальні значення загальної енергії за даними табл. 3.18, яка відповідає i -тому дослід; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід.

Таблиця 3.18 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{HЧК}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,9991	0,999<P<1,0	2,0<2,026
	$E_{HЧК.E}$	31,947	17,984	16,335	14,751			
	$E_{HЧК} = n / (0,0817874 \cdot n - 3,88259)$							
	$E_{HЧК.f}$	29,037	19,013	16,357	14,670			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9830	0,98<P<0,99	1,22<2,026
	$E_{HЧК.E}$	13,752	15,062	20,766	31,439			
	$E_{HЧК} = 1 / (-0,00281927 \cdot F_{CT} + 0,104105)$							
	$E_{HЧК.f}$	13,173	16,177	20,956	29,741			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9972	0,998<P<0,999	0,805<2,026
	$E_{HЧК.E}$	23,675	19,852	19,717	17,775			
	$E_{HЧК} = 2849,816604 / C + 17,020136$							
	$E_{HЧК.f}$	24,145	20,582	18,696	18,160			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9924	0,98<P<0,99	1,263<2,026
	$E_{HЧК.E}$	24,001	18,689	20,696	17,634			
	$E_{HЧК} = 22,06057 \cdot \beta^{-0,036446}$							
	$E_{HЧК.f}$	23,992	19,285	18,896	18,724			

Таблиця 3.19 – Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$1,62884 \cdot 10^{-4}$	$1,4342 \cdot 10^{-4}$	$1,32073 \cdot 10^{-4}$	$1,21874 \cdot 10^{-4}$	$9,6818 \cdot 10^{-5}$	$1,48878 \cdot 10^{-4}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
B_i	$9,2827 \cdot 10^{-5}$	$1,15099 \cdot 10^{-4}$	$8,3525 \cdot 10^{-5}$	$8,694 \cdot 10^{-5}$	$1,26931 \cdot 10^{-4}$	$1,46738 \cdot 10^{-4}$
№експ.	13	14	15	16		
B_i	$4,6461 \cdot 10^{-5}$	$8,4967 \cdot 10^{-5}$	$1,40373 \cdot 10^{-4}$	$1,58501 \cdot 10^{-4}$		

У табл. 3.20 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,3299 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{17/16} = 5,9509 \cdot 10^{-5}. \quad (3.13)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,1$ та числа степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . За формулою (3.13) інтервал виділення артефактів ($5,8511 \cdot 10^{-5}$; $1,77529 \cdot 10^{-4}$).

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma}{R_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,2786}{1,2279} \cdot 100\% = 22,7\%. \quad (3.14)$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $1,2279 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Таблиця 3.20 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$1,1802 \cdot 10^{-4}$	$0,1088 \cdot 10^{-8}$	$0,3299 \cdot 10^{-4}$	$1,75$ $\kappa=0,1$	$5,9509 \cdot 10^{-5}$; $4,6461 \cdot 10^{-5}$	$1,2279 \cdot 10^{-4}$	$0,0776 \cdot 10^{-8}$	$0,2786 \cdot 10^{-4}$

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$E_{HЧК} = B_{CP} \cdot f(n_o) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 1,2279 \cdot 10^{-4} \cdot (n / 0,0817874 \cdot n - 3,88259) \times \\ \times (1 / -0,00281927 \cdot F_{CT} + 0,104105) \times (2849,816604 / C + 17,020136) \times \\ \times (22,06057 \cdot \beta^{-0,036446}), H^2 \cdot M^2. \quad (3.15)$$

В табл. 3.21 наведено значення енергії $E_{HЧК.M}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $E_{HЧК.E}$, знайдені за формулою

$$ВП\% = \frac{E_{HЧК.E} - E_{HЧК.M}}{E_{HЧК.E}} \cdot 100. \quad (3.16)$$

Таблиця 3.21 – Експериментальні значення енергії низькочастотних коливань процесу зміни крутного моменту і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, $p_{ш}=1440$ МПа

№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне наванта- ження на долото $F_{CT}, \text{кН}$	Жорсткість компонування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$E_{HЧК.E}$ $H^2 \cdot M^2$	$E_{HЧК.M}$ $H^2 \cdot M^2$	ВП%
1	82	10	400	0,1	36,092	27,21	24,6
2	82	15	2500	40	23,595	20,2	14,4
3	82	20	800	70	31,256	29,063	7,0
4	82	25	1700	90	36,844	37,13	-0,78
5	133	10	800	90	9,345	11,852	-26,8
6	133	15	1700	70	16,177	13,342	17,5
7	133	20	400	40	17,222	22,781	-32,3
8	133	25	2500	0,1	29,194	31,149	-6,7
9	188	10	1700	40	6,489	9,540	-47,0
10	188	15	800	0,1	11,36	16,045	-41,2
11	188	20	2500	90	15,231*	14,735	3,2
12	188	25	400	70	32,27	27,01	16,3
13	285	10	2500	70	<u>3,081</u>	<u>8,143</u>	<u>164,3</u>
14	285	15	400	90	9,116	13,175	-44,5
15	285	20	1700	0,1	19,357	16,93	12,5
16	285	25	800	40	27,449	21,266	22,5

Середнє значення відносної похибки без відбракованого результату тринадцятого дослід: $ВП_{CP}=21,2\%$.

3.2.2 Емпірична модель енергії (дисперсії) низькочастотних коливань $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 2050 МПа

У табл. 3.22, 3.23 подано результати з визначення енергії $E_{HЧК}$, усереднені відповідно за режимними параметрами $F_{СТ}$, n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 3.22 – Експериментальні значення енергії $E_{HЧК}$, усереднені за значеннями режимних параметрів, $p_{ш}=2050$ МПа

$F_{СТ}, \text{кН} \backslash n, \text{ХВ}^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	11,121	8,884	5,534	5,522	31,061	7,765
15	6,856	9,176	7,789	9,067	32,888	8,222
20	15,342	17,222	14,328	14,884	61,776	15,444
25	25,07	29,194	25,502	27,449	107,215	26,804
Сума	58,389	64,476	53,153	56,922	232,94	
Середнє	14,597	16,119	13,514	14,230		

Таблиця 3.23 – Експериментальні значення енергії $E_{HЧК}$, усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту, $p_{ш}=2050$ МПа

$C, \text{кН/м} \backslash \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	11,121	7,789	14,884	29,194	62,988	15,747
40	17,222	27,449	5,534	6,856	57,061	14,265
70	25,502	15,342	9,176	5,522	55,542	13,886
90	9,067	8,884	25,07	14,328	57,349	14,337
Сума	62,912	59,464	54,664	55,9	232,94	
Середнє	15,728	14,866	13,666	13,975		

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями енергії $E_{HЧК}$ процесу зміни крутного моменту на долоті і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 3.24.

За табл. 3.24 умови задовільної апроксимації експериментальних даних підібраними емпіричними залежностями виконуються.

Таблиця 3.24 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=2050\text{МПа}$

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{HЧК}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,9941	0,99<P<0,998	1,138<1,456
	$E_{HЧК.E}$	14,597	16,119	13,514	14,23			
	$E_{HЧК} = n / (0,073231 \cdot n - 0,64360)$							
	$E_{HЧК.f}$	15,295	14,622	14,329	14,090			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9641	0,95<P<0,98	1,263<1,456
	$E_{HЧК.E}$	7,765	8,222	15,444	26,806			
	$E_{HЧК} = 1 / (-0,006626 \cdot F_{CT} + 0,204074)$							
	$E_{HЧК.f}$	7,256	9,552	13,975	26,025			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9995	0,999<P<1,0	0,2743<1,456
	$E_{HЧК.E}$	15,728	14,866	13,666	13,975			
	$E_{HЧК} = 854,90981 / C + 13,50631$							
	$E_{HЧК.f}$	15,644	14,575	14,009	13,848			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9666	0,95<P<0,98	0,209<1,456
	$E_{HЧК.E}$	15,747	14,265	13,886	14,337			
	$E_{HЧК} = 15,17554 - 0,243438 \cdot \ln \beta$							
	$E_{HЧК.f}$	15,736	14,278	14,141	14,080			

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між енергією низькочастотних коливань процесу зміни крутного моменту та змінними чинниками експерименту, $p_{ш}=2050\text{МПа}$:

$$E_{HЧК} = B_{CP} \cdot f(n_o) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (n / (0,073231 \cdot n - 0,64360)) \times \\ \times (1 / -0,006626 \cdot F_{CT} + 0,204074) \times (854,90981 / C + 13,50631) \times \\ \times (15,17554 - 0,243438 \cdot \ln \beta), H^2 \cdot m^2 \quad (3.17)$$

У табл. 3.25 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою (3.12), де $E_{HЧК_i}$ – експериментальні значення загальної енергії за даними табл. 3.15, які відповідають дослідом 17-32; $f(F_{CT_i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам дослідів 17-32, табл. 3.24.

Таблиця 3.25 – Значення коефіцієнта $B_i \cdot 10^{-4}$ для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	4,07056	2,3734	3,4825	3,19303	4,08031	3,31638
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	3,77319	3,52028	2,66104	2,48123	3,66967	3,09128
№експ.	29	30	31	32		
B_i	2,75816	3,849	3,4289	3,59706		

У табл. 3.26 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

Значення Δ обчислюється за формулою (3.18) і за цим значенням межі інтервалу визначення артефактів: $2,36614 \cdot 10^{-4}$ - $4,30205 \cdot 10^{-4}$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,5366 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{17/16} = 5,9509 \cdot 10^{-5}. \quad (3.18)$$

Коефіцієнт варіації за формулою (3.19) – $K_{BAP} = 16,1\%$.

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,3341 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Таблиця 3.26 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,3341 \cdot 10^{-4}$	$0,2879 \cdot 10^{-8}$	$0,5366 \cdot 10^{-4}$	1,75 $\alpha=0,1$	-	-	-	-

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$E_{HЧК} = B_{CP} \cdot f(n_d) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 3,3341 \cdot 10^{-4} \cdot (n / (0,073231 \cdot n - 0,64360)) \times \\ \times (1 / -0,006626 \cdot F_{CT} + 0,204074) \times (854,90981 / C + 13,50631) \times \\ \times (15,17554 - 0,243438 \cdot \ln \beta), H^2 \cdot M^2 \quad (3.19)$$

В табл. 3.27 наведено значення енергії $E_{HЧК.М}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, експериментальні значення планованого експерименту $E_{HЧК.Е}$ і значення ВП%.

Таблиця 3.27 – Експериментальні значення енергії низькочастотних коливань процесу зміни крутного моменту і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, $p_{ш}=2050 МПа$

№ досл.	Частота обертання n , $хв^{-1}$	Осьове статичне наванта- ження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	$E_{HЧК.Е}$ $H^2 \cdot M^2$	$E_{HЧК.М}$ $H^2 \cdot M^2$	ВП%
17	82	10	400	0,1	11,121	9,109	18,1
18	82	15	2500	40	6,856	9,631	-40,5
19	82	20	800	70	15,342	14,688	4,3
20	82	25	1700	90	25,07	26,178	-4,4
21	133	10	800	90	8,884	7,259	18,3
22	133	15	1700	70	9,176	9,225	-0,5
23	133	20	400	40	17,222	15,218	11,6
24	133	25	2500	0,1	29,194	27,648	5,3
25	188	10	1700	40	5,534	6,934	-25,3
26	188	15	800	0,1	7,789	10,466	-34,4

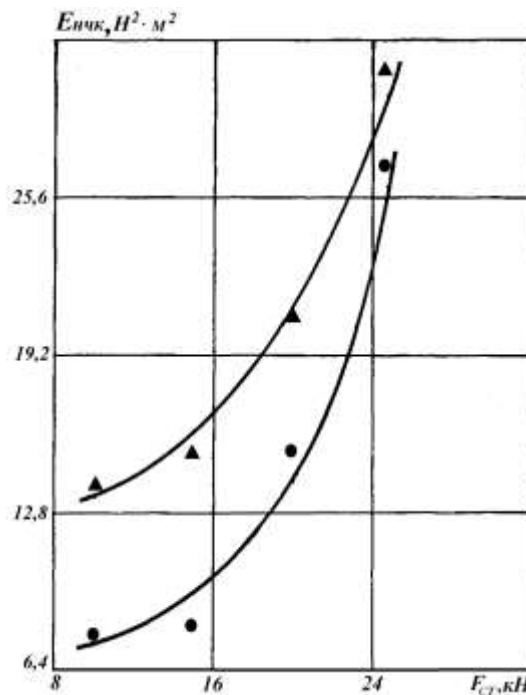
Продовження табл. 3.27

27	188	20	2500	90	14,328	13,018	9,1
28	188	25	400	70	25,502	27,506	-7,9
29	285	10	2500	70	5,522	6,675	-20,9
30	285	15	400	90	9,067	8,934	1,5
31	285	20	1700	0,1	14,884	14,473	2,8
32	285	25	800	40	27,449	25,443	7,9

Середнє значення відносної похибки: $ВП_{CP}=13,3\%$.

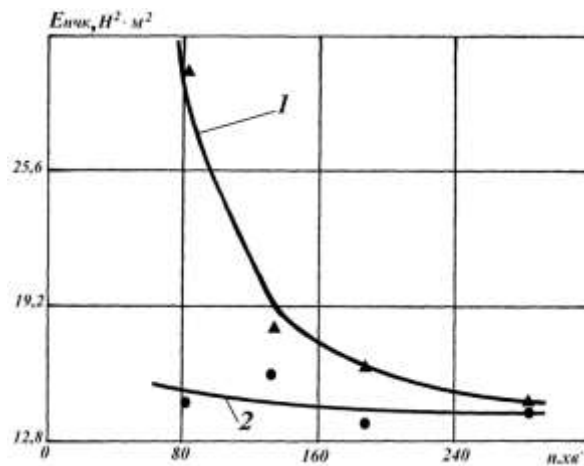
За вищенаведеним матеріалом із збільшенням твердості породи за всіма частинними залежностями $E_{HЧК} = f(F_{CT})$, $E_{HЧК} = f(n)$, $E_{HЧК} = f(C)$ і $E_{HЧК} = f(\beta)$ енергія низькочастотних коливань зменшується саме через вплив твердості породи. Враховуючи це доцільно графічно представити ці залежності для порід різної твердості.

На рис. 3.9-3.12 наведено графіки частинних емпіричних залежностей $E_{HЧК} = f(F_{CT})$, $E_{HЧК} = f(n)$, $E_{HЧК} = f(C)$ і $E_{HЧК} = f(\beta)$, побудовані за рівняннями регресії, які наведено в табл. 3.17 і 3.24.



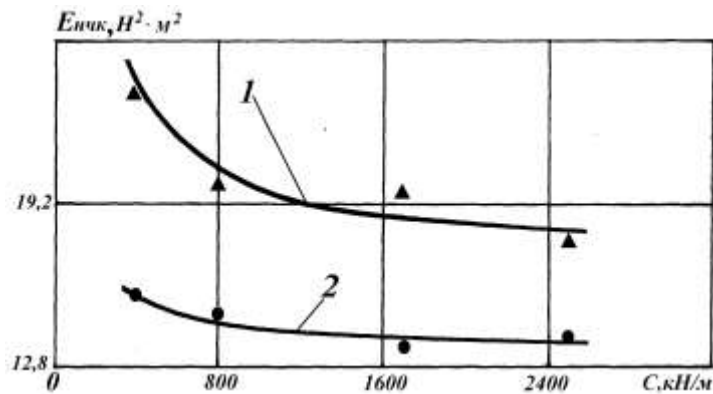
1(▲) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.9 – Графіки частинних залежностей $E_{HЧК.f} = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



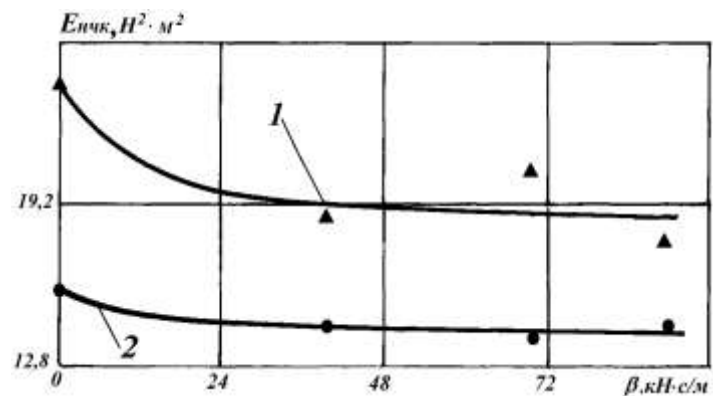
1(▲) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.10 – Графіки частинних залежностей $E_{нчк.f} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(▲) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.11 – Графіки частинних залежностей $E_{нчк.f} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(▲) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.12 – Графіки частинних залежностей $E_{нчк.f} = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

Частинні емпіричні залежності $E_{нчк.f} = f(F_{ст})$, рис. 3.9, для обох пропластків – монотонно зростаючі, тобто із збільшенням статичного осьового навантаження на долото енергія низькочастотних коливань збільшується. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.9, за 90% довірчими інтервалами одержані нерівності $13,65 < 15,3$; $17,15 < 20,8$ і $463,85 < 660,96$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу осьового навантаження на енергію низькочастотних коливань процесу зміни крутного моменту на долоті. Аналогічний висновок можна зробити і за 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.10.

За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.9 і Е.10, при зміні твердості породи, одержані нерівності $12,7 > 7,67$; $15,2 > 10,76$; $20,8 > 15,15$ і $28,31 > 26,67$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи величина енергії $E_{нчк}$ процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

Частинні емпіричні залежності $E_{нчк.f} = f(n)$, рис.3.10, для обох пропластків – монотонно спадаючі, тобто при зміні частоти обертання долота від 82 до 285 хв⁻¹ енергія низькочастотних коливань зменшується. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.11, за 90% довірчими інтервалами одержані нерівності $26,7 > 19,58$; $18,12 > 16,38$ і $16,34 > 14,74$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу частоти обертання на енергію $E_{нчк.f}$ процесу зміни крутного моменту на долоті. За 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.12, зміна величини $E_{нчк.f}$, в інтервалі 82-188 хв⁻¹ пояснюється випадковою похибкою, а не впливом зміни частоти обертання долота. В цьому інтервалі нерівність $E_{T.f.MIH.i} > E_{T.MAX.i+1}$ не підтверджується, $14,75 < 15,82$; $13,43 < 15,04$. Нерівність підтверджується тільки при зміні частоти обертання 82 хв⁻¹ на частоту 285 хв⁻¹, $14,75 > 14,21$. Такий висновок підтверджується також мінімально допустими 80% довірчими інтервалами для значень $E_{нчк.f}$, обчисленими для всіх рівнів частоти обертання.

За 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.11 і Е.12, при зміні твердості породи, одержані нерівності $26,7 > 15,84$; $18,12 > 15,82$; $16,34 > 15,04$ і $14,6 > 14,21$, тобто

з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи величина енергії E_{HCK} процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

За рис. 3.11 частинні емпіричні залежності $E_{HCK.f} = f(C)$ для обох пропластків різної твердості городищенської світи, монотонно спадаючі. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.13, за 90% довірчими інтервалами і нерівністю $E_{T.f.MIN.i} > E_{T.MAX.i+1}$ одержано, $23,74 > 21,21$; $19,96 > 19,53$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу жорсткості на енергію низькочастотних коливань процесу зміни крутного моменту на долоті в інтервалі 400-1700 кН/м. В інтервалі 1700-2500 кН/м нерівність, за 90% довірчими інтервалами, не підтверджена – $17,86 < 18,49$, не підтверджена також і мінімально допустима 80% нерівність $18,16 < 18,18$.

Аналогічний висновок можна зробити і за 90% довірчими інтервалами, одержаними при бурінні в породі твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.14.

Зміна твердості породи з 1440 МПа до 2050 МПа приводить до зменшення енергії $E_{HCK.f}$ на всіх рівнях жорсткості бурильного інструменту.

При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.15, за 90% довірчими інтервалами нерівність $E_{T.f.MIN.i} > E_{T.MAX.i+1}$ підтверджена в інтервалі значень коефіцієнту демпфування 0-40 кН·с/м, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати про наявність впливу частоти обертання на енергію $E_{HCK.f}$ процесу зміни крутного моменту на долоті. В інтервалі значень 40-90 кН·с/м зміна коефіцієнту демпфування не впливає на величину $E_{HCK.f}$, і її різні значення пояснюються випадковою похибкою експерименту. Цей висновок підтверджений і результатами аналізу, одержаними і для мінімально допустимої довірчої ймовірності 0,8.

Для породи твердістю 2050 МПа результати аналізу, за 80% і 90% довірчими інтервалами, аналогічні результатам, одержаних для породи 1440 МПа, вплив коефіцієнту демпфування на енергію низькочастотних коливань зафіксований тільки в інтервалі 0-40 кН·с/м. Зміна твердості породи з 1440 МПа до 2050 МПа

приводить до зменшення енергії $E_{нчк.f}$ на всіх рівнях коефіцієнту демпфування бурильного інструменту.

За наведеним вище матеріалом найбільший вплив на величину $E_{нчк}$ має осьове навантаження на долото. При зміні навантаження від 10 кН до 25 кН величина енергії збільшилась, за експериментальними даними, для породи твердістю 1440 МПа, в 2,29 рази, для породи твердістю 2050 МПа – в 3,45 рази. Для частоти обертання, інтервал зміни 285-82 хв⁻¹, значення $E_{нчк.f}$ зменшилось відповідно в 2,16 і 1,19 рази. При зміні жорсткості бурильного інструменту з 2500 кН/м до 400 кН/м енергія низькочастотних коливань збільшилась відповідно в 1,33 і 1,15 рази. При зміні коефіцієнту демпфування від 0 до 40 кН·с/м енергія низькочастотних коливань зменшилась 1,28 і 1,1 рази, менші значення для породи більшої твердості. Подальше збільшення коефіцієнту демпфування не вплинуло на величину $E_{нчк}$.

3.3 Багатофакторні емпіричні моделі множинної нелінійної кореляції енергії зубцевих коливань $E_{зк}$ процесу зміни крутного моменту на долоті вигляду

$$E_{зк} = B_{ср} \cdot f(n) \cdot f(F_{ст}) \cdot f(\beta) \cdot f(C), H^2 \cdot m^2$$

За результатами експериментальних досліджень [7, 8, 9] встановлено, що основна причина появи зубцевих коливань – це перекочування шарошок долота з зубця на зубець по нерівній поверхні вибою.

Теоретичне значення частоти цих коливань залежить від розміщення зубців на поверхні шарошок і визначається за формулою

$$f_{зуб} = \frac{D_{дол} \cdot n \cdot Z_{min}}{d_{ш} \cdot 60} \Gamma \zeta, \quad (3.20)$$

де $D_{дол}$ – діаметр долота; $d_{ш}$ – діаметр шарошки; Z_{min} – мінімальне число зубців периферійного вінця шарошки долота.

Під час буріння шарошковими долотами із фрезерованими зубцями на вибої свердловини утворюється зубчаста периферійна рейка [7, 9, 60], яка впливає на процес взаємодії долота з вибоєм і збільшує або зменшує коефіцієнт проковзування.

Результатом цього є відмінність між теоретичним і експериментальним значеннями частоти зубцевих коливань. За кількістю виступів периферійної рейки експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначається за формулою

$$f_{зуб.Е} = \frac{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ} \cdot Z_P}{d_{СВ} \cdot 60} Гц, \quad (3.21)$$

де $d_{СВ}$ – діаметр свердловини, мм, Z_P – число виступів рейки;

В додатку Е наведено характеристики долота ІІІ-93Т-ЦА і методику визначення експериментальних значень зубцевих коливань та їх значення відповідно до частоти обертання долота, а також типову спектрограму (графік спектральної щільності) процесу зміни крутного моменту на долоті.

Матрицю планованого експерименту зі значеннями енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{ЗК}$ процесу зміни крутного моменту подано в табл. 3.28.

Таблиця 3.28 – План чотирифакторного експерименту зі значеннями енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{ЗК}$ процесу зміни крутного моменту

№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне наванта- ження на долото $F_{СТ}, \text{кН}$	Жорсткість компо- нування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$E_{ЗК},$ $\text{Н}^2 \cdot \text{м}^2$	
					$P_{Ш},$ 1440МПа	$P_{Ш},$ 2050МПа
1(17)	82	10	400	0,1	9,9901	5,7027
2(18)	82	15	2500	40	7,1338	5,5026
3(19)	82	20	800	70	6,8663	6,5937
4(20)	82	25	1700	90	9,1894	7,3089
5(21)	133	10	800	90	1,5665	1,2571
6(22)	133	15	1700	70	5,6217	7,7476
7(23)	133	20	400	40	8,3547	5,2472
8(24)	133	25	2500	0,1	8,7351	8,7351
9(25)	188	10	1700	40	2,9876	2,4956
10(26)	188	15	800	0,1	7,9978	6,1534
11(27)	188	20	2500	90	6,5071	6,5071
12(28)	188	25	400	70	5,2612	5,2934
13(29)	285	10	2500	70	2,1259	1,0431
14(30)	285	15	400	90	1,188	1,1888
15(31)	285	20	1700	0,1	6,9733	5,5051
16(32)	285	25	800	40	12,4702	13,1053

3.3.1 Емпірична модель енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{зк}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 1440 МПа

У табл. 3.29 і 3.30 експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені відповідно за режимними параметрами $F_{СТ}$, n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 3.29 – Експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями режимних параметрів

$F_{СТ}, \text{кН} \backslash n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	9,9901	1,5665	2,9876	2,1259	16,6701	4,1675
15	7,1338	5,6217	7,9978	1,188	21,9413	5,4853
20	6,8663	8,3547	6,5071	6,9733	28,7014	7,1754
25	9,1894	8,7351	5,2612	12,4702	35,6559	8,914
Сума	33,1796	24,278	22,7537	22,7574	102,9687	
Середнє	8,2949	6,0695	5,6884	5,6894		

Таблиця 3.30 – Експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту

$C, \text{кН/м} \backslash \beta, \text{кН} \cdot \text{с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	9,9901	7,9978	6,9733	8,7351	33,6963	8,4241
40	8,3547	12,4702	2,9876	7,1338	30,9464	7,7366
70	5,2612	6,8663	5,6217	2,1259	19,8751	4,9688
90	1,188	1,5665	9,1894	6,5071	18,451	4,6128
Сума	24,794	28,9008	24,772	24,5019	102,9687	
Середнє	6,1985	7,2252	6,193	6,1255		

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими експериментальними значеннями енергії зубцевих коливань $E_{зк}$ процесу зміни крутного моменту і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 3.31.

За табл. 3.31 умови задовільної апроксимації експериментальних даних підібраними емпіричними залежностями виконуються.

Отже, на основі експериментальних даних, одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між енергією зубцевих коливань процесу зміни крутного моменту та змінними чинниками експерименту.

$$E_{3K} = B_{CP} \cdot f(n_d) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (n / 0,196283 \cdot n - 5,025297) \times \\ \times (0,318592 \cdot F_{CT} + 0,86019) \times (3,3557595 + 0,00990474 \cdot C - \\ - 7,66464 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 1,65793 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times (-0,04673 \cdot \beta + 8,7732), H^2 \cdot m^2 \quad (3.22)$$

У табл. 3.32 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{E_{3K.E.i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (3.23)$$

де E_{3K} – експериментальні значення енергії зубцевих коливань за даними табл. 3.28, яка відповідає i -тому дослід; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід, табл. 3.31.

Таблиця 3.32 – Значення коефіцієнта $B_i \cdot 10^{-3}$ для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	6,13267	4,03352	3,22414	4,96968	1,85947	4,63726
№експ.	7	8	9	10	11	12
B_i	3,368885	2,92092	2,928151	3,79567	5,452788	2,96386
№експ.	13	14	15	16		
B_i	2,785153	1,32937	3,172243	5,060739		

У табл. 3.33 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 1,3073 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{17/16} = 2,8568 \cdot 10^{-3}. \quad (3.24)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,1$ та числа степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів $(1,3065 \cdot 10^{-3} - 6,0229 \cdot 10^{-3})$.

Таблиця 3.31 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{3K}$
n , ХВ ⁻¹	82		133	188	285	0,9976	0,99<P<0,998	0,55<1,456
	$E_{3K.E}$	8,2949	6,0695	5,6884	5,6894			
	$E_{3K.f} = n / 0,196283 \cdot n - 5,025297$							
	$E_{3K.f}$	7,4075	6,3092	5,8979	5,5975			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9980	P=0,998	0,13<0,64
	$E_{3K.E}$	4,1675	5,4853	7,1754	8,914			
	$E_{3K.f} = 0,318592 \cdot F_{CT} + 0,86019$							
	$E_{3K.f}$	4,0461	5,6391	7,2320	8,8250			
C , кН/м	400		800	1700	2500	1,0	P=1,0	$4,09 \cdot 10^{-14} < 0,64$
	$E_{3K.E}$	6,1985	7,2252	6,193	6,1255			
	$E_{3K.f} = 3,355693 + 0,0099077 \cdot C - 7,66494 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 1,6580 \cdot 10^{-9} \cdot C^3$							
	$E_{HЧK.f}$	6,1985	7,2252	6,1929	6,1254			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9493	P=0,95	0,6<0,64
	$E_{3K.E}$	8,4241	7,7366	4,9688	4,6128			
	$E_{3K.f} = -0,04673 \cdot \beta + 8,7732$							
	$E_{HЧK.f}$	8,7685	6,9040	5,5021	4,5675			

Таблиця 3.33 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

$B_{CP} \cdot 10^{-3}$	$D_B \cdot 10^{-6}$	$\sigma_B \cdot 10^{-3}$	K_{CT}	Відб.зн, N'	$B'_{CP} \cdot 10^{-3}$	$D'_B \cdot 10^{-6}$	$\sigma'_B \cdot 10^{-3}$
3,6647	1,709	1,3073	1,75 $\alpha=0,1$	6,13267· 10^{-3}	3,5001	1,3671	1,1692

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Коефіцієнт варіації за формулою (3.4) – $K_{BAP} = 33\%$. Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,5001 \cdot 10^{-3}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За зазначеним вище рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної кореляції визначається за експериментальними даними і буде мати вигляд

$$E_{3K.M} = B_{CP} \cdot f(n_\theta) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 3,5001 \cdot 10^{-3} \cdot (n / 0,196283 \cdot n - 5,025297) \times \\ \times (0,318592 \cdot F_{CT} + 0,86019) \times (3,3557595 + 0,00990474 \cdot C - \\ - 7,66464 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 1,65793 \cdot 10^{-9} \cdot C^3) \times (-0,04673 \cdot \beta + 8,7732), H^2 \cdot M^2 \quad (3.25)$$

В табл. 3.34 наведено значення енергії E_{3KM} , визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту – E_{3KE} , табл. 3.28.

Таблиця 3.34 – Експериментальні значення енергії E_{3K} процесу зміни крутного моменту на долоті і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	E_{3KE} , $H^2 \cdot M^2$	E_{3KM} , $H^2 \cdot M^2$	ВП%
1	82	10	400	0,1	9,9901	5,7073	42,9
2	82	15	2500	40	7,1338	6,1830	13,3
3	82	20	800	70	6,8663	7,454	8,6
4	82	25	1700	90	9,1894	6,472	29,6
5	133	10	800	90	1,5665	2,9486	88,2

Продовження табл. 3.34

6	133	15	1700	70	5,6217	4,2431	24,5
7	133	20	400	40	8,3547	8,6801	3,9
8	133	25	2500	0,1	8,7351	10,4672	19,8
9	188	10	1700	40	2,9876	8,5712	19,5
10	188	15	800	0,1	7,9978	7,3750	7,8
11	188	20	2500	90	6,5071	4,1768	35,8
12	188	25	400	70	5,2612	6,2131	18,1
13	285	10	2500	70	2,1259	2,6716	25,7
14	285	15	400	90	1,188	8,1279	163,3
15	285	20	1700	0,1	6,9733	7,6940	10,3
16	285	25	800	40	12,4702	8,6246	30,8

Значення ВП% 42,9 відбраковане за даними табл. 3.33, а значення ВП% 88,2 і 163,3 відбраковані як викиди (артефакти) за вибіркою значень ВП%, табл. 3.34. Середнє значення відносної похибки без цих значень, які в табл. 3.34 виділені, $ВП_{CP}=19,0\%$.

3.3.2 Емпірична модель енергії (дисперсії) зубцевих коливань $E_{зк}$ процесу зміни крутного моменту для пропластка твердістю 2050 МПа

У табл. 3.35 і 3.36 подано експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 3.35 – Експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями режимних параметрів

$n, \text{хв}^{-1}$ $F_{CT}, \text{кН}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	5,7027	1,2571	2,4956	1,0431	10,4985	2,6246
15	5,5026	7,7476	6,1534	1,1888	20,5924	5,1481
20	6,5937	5,2472	6,5071	5,5051	23,8531	5,9633
25	7,3089	8,7351	5,2934	13,1053	34,4427	8,6107
Сума	25,1079	22,987	20,4495	20,8423	89,3867	22,3467
Середнє	6,27698	5,74675	5,1124	5,2106	22,3467	5,5867

Таблиця 3.36 – Експериментальні значення енергії $E_{зк}$, усереднені за значеннями параметрів бурильного інструменту

$C, \text{кН/м}$ $\beta, \text{кН·с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	5,7027	6,1534	5,5051	8,7351	26,0963	6,5241
40	5,2472	13,1053	2,4956	5,5026	26,3507	6,5877
70	5,2934	6,5937	7,7476	1,0431	20,6778	5,16945
90	1,1888	1,2571	7,3089	6,5071	16,2619	4,0655
Сума	17,4321	27,1095	23,0572	21,7879	89,3867	22,3467
Середнє	4,3580	6,7774	5,7643	5,44697	22,3467	5,5867

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими експериментальними значеннями енергії зубцевих коливань $E_{зк}$ і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 3.37.

За вищенаведеним матеріалом ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $E_{зк}$ та зовнішніми незалежними змінними факторами (чинниками), а саме n і $F_{СТ}$ більша за 0,98, ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими і умова існування таких залежностей $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$ виконується.

Для β ймовірність існування залежності рівна 0,88, що дещо менше за допустимий нижній рівень ймовірності 0,9. Для збільшення величини вибіркового коефіцієнта кореляції для емпіричної залежності $E_{зк.f} = f(\beta)$ була використана методика обробки результатів досліджень, проведених за планом факторного експерименту, підрозділ 2.2. За цією методикою, з метою підсилення впливу коефіцієнту демпфування бурильного інструменту, було нейтралізовано вплив найбільш потужних зовнішніх чинників, осьового статичного навантаження на долото і коефіцієнт жорсткості бурильного інструменту методика, але досягнути збільшення коефіцієнту кореляції не вдалось і тому при створенні багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції енергії зубцевих коливань динамічної складової крутного моменту використовується емпіричне рівняння регресії $E_{зк.f} = f(\beta)$, підбраної за первинними експериментальними даними. Для чинника C апроксимація експериментальних даних проведена поліномом третього ступеня, який характеризується наявністю мінімаксів, ймовірність частинної залежності рівна 1, умова існування залежності $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{зк}$ виконується, тобто це задовільний результат.

Таблиця 3.37 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=2050$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{E}_{3K}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,9983	0,998<P<0,999	0,18<0,56
	$E_{3K.E}$	6,2770	5,7468	5,1124	5,2106			
	$E_{3K.f} = n / 0,2071328 \cdot n - 3,70773$							
	$E_{3K.f}$	6,1760	5,5786	5,3359	5,1514			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9826	0,98<P<0,99	0,46<0,56
	$E_{3K.E}$	2,6246	5,1418	5,9633	8,6107			
	$E_{3K.f} = 0,37547 \cdot F_{CT} - 0,98405$							
	$E_{3K.f}$	2,7706	4,648	6,5254	8,4027			
C , кН/м	400		800	1700	2500	1,0	P=1	$4,982 \cdot 10^{-14} < 0,56$
	$E_{3K.E}$	4,358	6,7774	5,7643	5,447			
	$E_{3K.f} = 2,8321 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C - 1,36801826$							
	$E_{HЧK.f}$	4,363	6,7977	5,8560	5,6452			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,8896	P=0,88	0,55<0,56
	$E_{3K.E}$	6,5241	6,5877	5,1694	4,0655			
	$E_{3K.f} = -0,027447 \cdot \beta + 6,959693$							
	$E_{HЧK.f}$	6,9569	5,8618	5,0384	4,4895			

У табл. 3.38 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою (3.23), де $E_{зк}$ – експериментальні значення енергії зубцевих коливань за даними табл. 3.28, яка відповідає i -тому дослід; $f(F_{ст.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід і виділені у табл. 3.37.

Таблиця 3.38 – Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	$1,097965 \cdot 10^{-2}$	$5,792742 \cdot 10^{-3}$	$4,77053 \cdot 10^{-3}$	$5,357063 \cdot 10^{-3}$	$2,665083 \cdot 10^{-3}$	$1,012703 \cdot 10^{-2}$
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	$5,635975 \cdot 10^{-3}$	$4,744917 \cdot 10^{-3}$	$4,917692 \cdot 10^{-3}$	$5,246426 \cdot 10^{-3}$	$7,373867 \cdot 10^{-3}$	$5,370569 \cdot 10^{-3}$
№експ.	29	30	31	32		
B_i	$2,569536 \cdot 10^{-3}$	$2,534686 \cdot 10^{-3}$	$4,019906 \cdot 10^{-3}$	$7,598184 \cdot 10^{-3}$		

У табл. 3.39 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$.

$$\Delta = t_{кр} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,34 \cdot 2,4275 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{17/16} = 3,352961 \cdot 10^{-3}, \quad (3.26)$$

де $t_{кр}$ – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,2$ та числом степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів $(2,539538 \cdot 10^{-3}; 9,245461 \cdot 10^{-3})$.

Таблиця 3.39 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$5,8925 \cdot 10^{-3}$	$5,892 \cdot 10^{-6}$	$2,4275 \cdot 10^{-3}$	1,34 $\alpha=0,2$	$1,097965 \cdot 10^{-2};$ $1,012703 \cdot 10^{-2};$ $2,534686 \cdot 10^{-3}$	$5,0817 \cdot 10^{-3}$	$2,1751 \cdot 10^{-6}$	$1,4748 \cdot 10^{-3}$

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Коефіцієнт варіації за формулою (3.4) – $K_{BAP} = 29\%$. Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33%, тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $5,0817 \cdot 10^{-3}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За зазначеним вище рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної кореляції визначається за експериментальними даними і буде мати вигляд

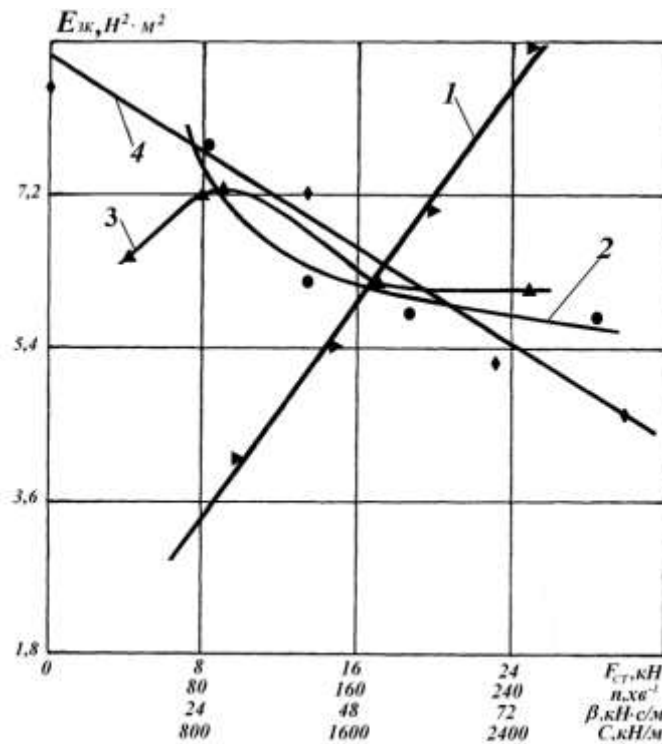
$$E_{3КМ} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 5,0817 \cdot 10^{-3} \cdot (n / 0,2071328 \cdot n - 3,70773) \times \\ \times (0,37547 \cdot F_{CT} - 0,98405) \times (2,83211 \cdot 10^{-9} \cdot C^3 - 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 + \\ + 1,93546 \cdot 10^{-2} \cdot C - 1,3680183) \times (-0,027447 \cdot \beta + 6,959693), H^2 \cdot м^2. \quad (3.27)$$

В табл. 3.40 наведено значення енергії $E_{3КМ}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $E_{3КЕ}$.

Таблиця 3.40 – Експериментальні значення енергії $E_{3К}$ процесу зміни крутного моменту на долоті і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції для пропластка твердістю 2050 МПа

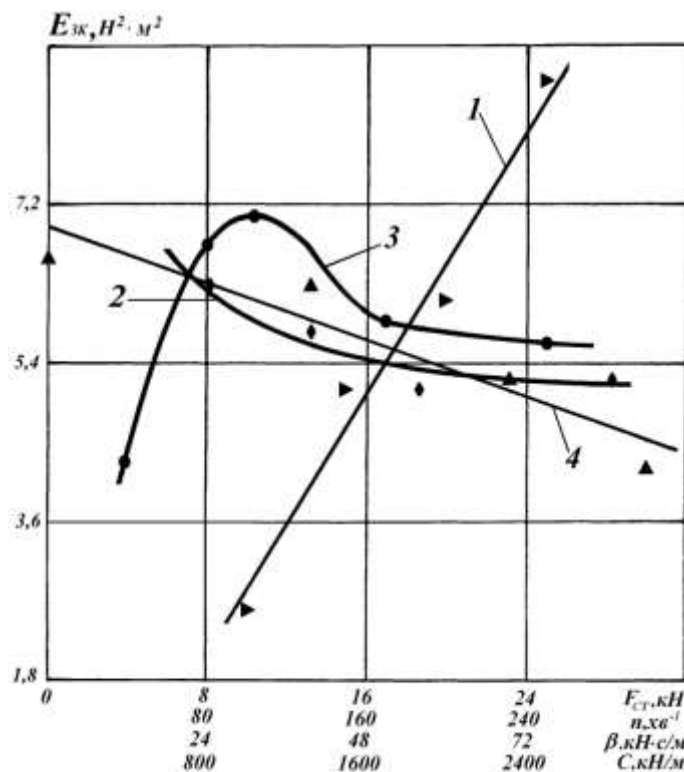
№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне наванта- ження на долото $F_{CT}, \text{кН}$	Жорсткість компонування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$E_{3КЕ},$ $H^2 \cdot м^2$	$E_{3КМ},$ $H^2 \cdot м^2$	ВП%
17	82	10	400	0,1	5,7027	не визн.	
18	82	15	2500	40	5,5026	4,8272	12,3
19	82	20	800	70	6,5937	7,0142	-6,4
20	82	25	1700	90	7,3089	6,9332	5,1
21	133	10	800	90	1,2571	1,397	-11,1
22	133	15	1700	70	7,7476	не визн.	
23	133	20	400	40	5,2472	4,7312	9,8
24	133	25	2500	0,1	8,7351	9,3551	-7,1
25	188	10	1700	40	2,4956	2,5788	-3,3
26	188	15	800	0,1	6,1534	5,9602	3,1
27	188	20	2500	90	6,5071	4,4844	31,1
28	188	25	400	70	5,2934	5,0087	5,4
29	285	10	2500	70	1,0431	не визн.	
30	285	15	400	90	1,1888	1,3834	-16,4
31	285	20	1700	0,1	5,5051	6,9592	-26,4
32	285	25	800	40	13,1053	8,7649	33,1

Середнє значення відносної похибки без відбракованих значень $B_{CP.i}$ (1, 6 і 13 досліди) $-ВП_{CP}=10,7\%$. Зі збільшенням твердості породи за всіма частинними залежностями $E_{CK} = f(F_{CT})$, $E_{CK} = f(n)$, $E_{CK} = f(C)$ і $E_{CK} = f(\beta)$ енергія зубцевих коливань зменшується через вплив твердості породи. Враховуючи це доцільно графічно представити ці залежності для порід різної твердості.



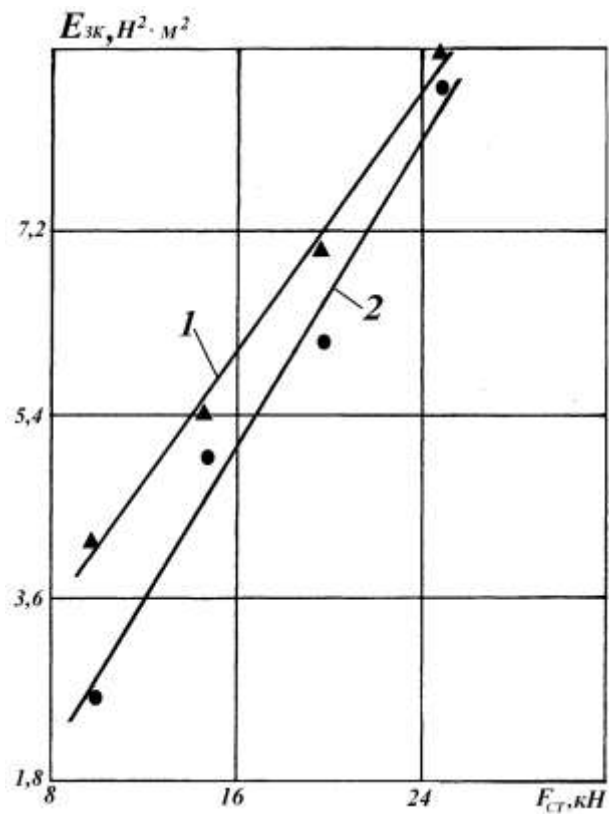
1(►) – $E_{3K} = f(F_{CT})$; 2(●) – $E_{3K} = f(n)$; 3(▲) – $E_{3K} = f(C)$; 4(◆) – $E_{3K} = f(\beta)$

Рисунок 3.13 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 1440 МПа



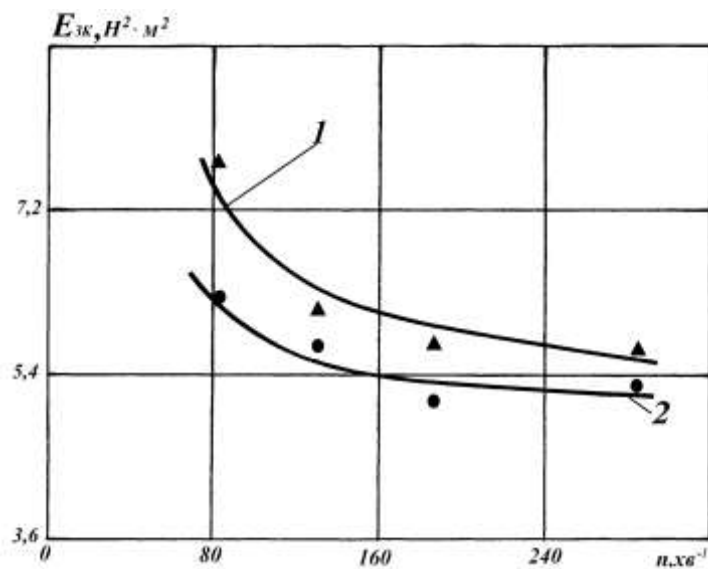
1(►) – $E_{3K} = f(F_{CT})$; 2(◆) – $E_{3K} = f(n)$; 3(●) – $E_{3K} = f(C)$; 4(▲) – $E_{3K} = f(\beta)$

Рисунок 3.14 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 2050 МПа



1($\blacktriangle$) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2($\bullet$) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.15 – Графіки частинних залежностей $E_{3K.f} = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1($\blacktriangle$) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2($\bullet$) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 3.16 – Графіки частинних залежностей $E_{3K.f} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

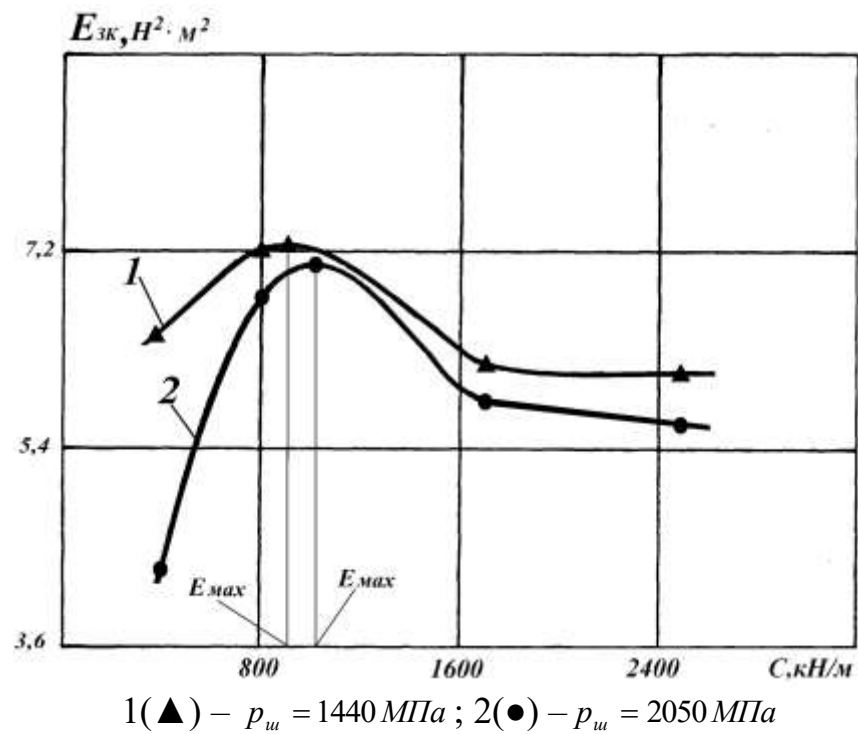


Рисунок 3.17 – Графіки частинних залежностей $E_{zk.f} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

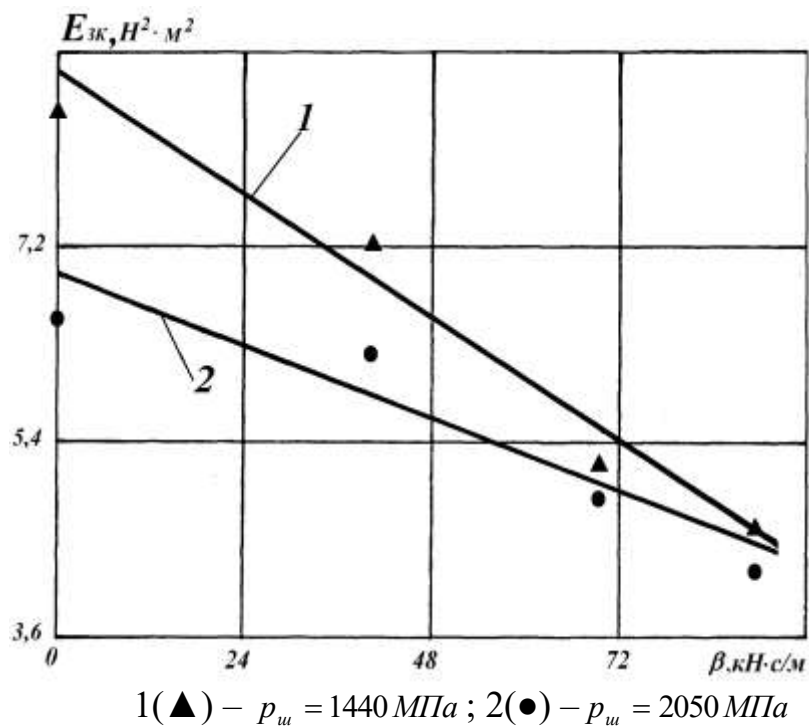


Рисунок 3.18 – Графіки частинних залежностей $E_{нчк.f} = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

На рис. 3.13 і 3.14 зображено графіки частинних залежностей $E_{зк} = f(F_{СТ})$, $E_{зк} = f(n)$ і $E_{зк} = f(\beta)$ і $E_{зк} = f(C)$, побудованими за значеннями емпіричних рівнянь регресії, наведеними в табл. 3.31 і 3.37.

На рисунках 3.15-3.18 наведено графіки частинних емпіричних залежностей $E_{нчк} = f(F_{СТ})$, $E_{нчк} = f(n)$, $E_{нчк} = f(C)$ і $E_{нчк} = f(\beta)$, побудовані за рівняннями регресії, які наведено в табл. 3.31 і 3.37.

За частинними емпіричними залежностями $E_{зк} = f(F_{СТ})$, рис. 3.15, незалежно від твердості породи, енергія зубцевих коливань монотонно збільшується при зростанні осьового навантаження на долото від 10 до 25 кН. Цей висновок підтверджується 90% довірчими інтервалами на всіх рівнях навантаження, додаток Е, табл. Е.19 і Е.20.

За цими ж 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.19 і Е.20, можна стверджувати, з ймовірністю 0.9, що із збільшенням твердості породи енергія зубцевих коливань процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

За результатами процесу буріння в породі твердістю 1440 МПа із збільшенням частоти обертання енергія зубцевих коливань зменшується на протязі всього інтервалу 82-285 хв⁻¹, рис. 3.16. Причиною такого зменшення величини $E_{зк}$ є зростання частоти обертання долота, що підтверджується 90% довірчими інтервалами значень $E_{зк}$ на всіх рівнях частоти, додаток Е, табл. Е.21 і Е.22. При бурінні в породі твердістю 2050 МПа, в інтервалі частот 82-133 хв⁻¹, вплив частоти обертання підтверджено 90% довірчими інтервалами значень $E_{зк}$, а в інтервалі 133-285 хв⁻¹ такий же висновок можна зробити тільки за мінімально допустимими 80% довірчими інтервалами.

За цими ж 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл.Е.21 і Е.22, можна стверджувати, з ймовірністю 0.9, що із збільшенням твердості породи енергія зубцевих коливань процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

За рис. 3.18, зміна незалежного зовнішнього чинника, коефіцієнта демпфування компонування бурильного інструмента, є причиною зменшення величини $E_{зк}$, незалежно від твердості породи, в інтервалі від нуля до 90 кН·с/м, що

підтверджується 90% довірчими інтервалами значень $E_{зк}$ на всіх рівнях коефіцієнту, додаток Е, табл. Е.23 і Е.24.

Емпіричні частинні залежності $E_{зк.f} = f(C)$, незалежно від твердості породи, апроксимовані поліномом третього ступеня. За цими рівняннями основна похибка практично відсутня, і для породи твердістю 1440 МПа становить $\sigma_0 = 4,09 \cdot 10^{-14} \text{Н}^2 \text{м}^2$, а для твердості 2050 МПа – $\sigma_0 = 4,982 \cdot 10^{-14} \text{Н}^2 \text{м}^2$. За цим значення експериментальних даних і значення, обчислені за поліномом третього ступеня, практично співпадають, тобто між цими значеннями випадкова похибка відсутня. Для цих залежностей спостерігається поява чітко вираженого локального максимуму, який виникає внаслідок зміни жорсткості компонування а не внаслідок випадкової похибки. При бурінні в породі 1440 МПа значення локального максимуму зафіксовано для жорсткості 922 кН/м, для породи 2050 МПа – значення жорсткості 1045 кН/м.

Висновки до розділу 3

1. Вперше за результатами досліджень, проведених на основі планованого факторного експерименту з використанням методів спектрального аналізу, проаналізовано внутрішню структуру процесу зміни крутного моменту на долоті, як випадкової стаціонарної функції. За цими дослідженнями виділені основні характеристики внутрішньої структури: загальна енергія у процесу зміни моменту і основні складові енергетичного спектра цього процесу, низькочастотні та зубцеві крутильні коливання долота;

2. Вперше встановлено, що характер зміни емпіричних залежностей $E_T = f(F_{CT})$, $E_{нчк} = f(F_{CT})$ і $E_{зк} = f(F_{CT})$ ідентичний, за яким із збільшенням навантаження енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зростає. Це підтверджено 90% довірчими інтервалами для всіх значень емпіричних залежностей на всіх рівнях осьового навантаження в інтервалі 10-25 кН;

3. Аналогічний висновок можна зробити і для залежностей $E_T = f(n)$, $E_{нчк} = f(n)$ і $E_{зк} = f(n)$ за винятком того, що із збільшенням частоти обертання

долота енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зменшується.

4. Більш ефективним, з точки зору інтенсифікації процесу руйнування гірської породи, з двох основних режимних параметрів буріння свердловин, є збільшення осевого навантаження на долото;

5. Вперше встановлено, що характер зміни емпіричних залежностей $E_T = f(\beta)$, $E_{HЧК} = f(\beta)$ і $E_{ЗК} = f(\beta)$ ідентичний, за якими із збільшенням коефіцієнту демпфування енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зменшується незалежно від твердості породи.

6. Вперше встановлено, характер зміни емпіричних залежностей $E_T = f(C)$ і $E_{ЗК} = f(C)$ ідентичний, який характеризується появою локального максимуму в однаковому інтервалі значень жорсткості компонування бурильного інструменту. в цьому ж інтервалі зафіксовано мінімум енергоємності процесу руйнування породи [1]. За графіками $E_T = f(C)$ і $E_{ЗК} = f(C)$, очевидно, можна прогнозувати значення жорсткості бурильного інструменту за якою енергоємність процесу руйнування гірської породи буде мінімальною.

При апроксимації експериментальних даних емпіричною залежністю $E_{HЧК} = f(C)$ локальний максимум відсутній, а залежність представлена плавною “розумною” кривою, за якою із зростанням жорсткості величина $E_{HЧК}$ зменшується.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ БУРІННЯ І КОМПОНУВАННЯ БУРИЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ЗМІНИ КРУТНОГО МОМЕНТУ НА ДОЛОТІ

З метою більш детального аналізу результатів досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті пропонується ввести нові показники процесу інтенсивності руйнування гірської породи. До цих показників відносимо інтегральний коефіцієнт оцінки динамічності зміни моменту і величину подвійної амплітуди $2A_r$ коливного процесу зміни крутного моменту на долоті. Інтегральний коефіцієнт оцінки динамічності зміни моменту представляє собою відношення загальної енергії E_T до квадрату величини моментоемності $\bar{T}_\phi$ і обчислюється за формулою

$$K_{\text{дин.ін}} = \frac{E_T}{(\bar{T}_\phi)^2}. \quad (4.1)$$

Подвійна амплітуда, як оцінка зміни коливного процесу, основне застосування одержала у вібродіагностиці. За аналізом літературних джерел використання подвійної амплітуди для оцінки процесу зміни крутного моменту на долоті, яка представляє собою різницю між найбільшим і найменшим значеннями записаної (зафіксованої) реалізації $2A_r$ не виявлено. Такий параметр можна використовувати як експрес-метод оцінки процесу зміни крутного моменту на долоті безпосередньо у процесі буріння, а також в тому випадку, коли з тих чи інших причин середнє значення (моментоемність) не визначене, а запис реалізації моменту проводився на незначній швидкості, при якій фіксуються практично тільки локальні максимуми та мінімуми процесу зміни крутного моменту на долоті [67].

Загальноприйнятим, на сьогоднішній день параметром оцінки коливного процесу зміни крутного моменту є максимальне значення коефіцієнта динамічності $k_{T.\phi.\text{max}}$ [11]. За змінним характером крутного моменту миттєве значення моменту можна представити формулою

$$T_{\phi.i} = \bar{T}_\phi \pm T_{T.\phi.\text{дин.}i}, \quad (4.2)$$

де $T_{\partial.i}$ – миттєве значення моменту на долота, $\bar{T}_{\partial}$ – середнє значення моменту на долоті (моментоемність), яке можна вважати умовно постійною величиною, $T_{\partial.ин.i}$ – динамічний складник крутного моменту на долоті.

Відносні коливання крутного моменту (з урахуванням формули (4.2) можна характеризувати коефіцієнтом динамічності, який можна визначити за формулою

$$k_{T.\partial.i} = \frac{T_{\partial.i}}{\bar{T}_{\partial}} = \frac{\bar{T}_{\partial} \pm T_{\partial.ин.i}}{\bar{T}_{\partial}}. \quad (4.3)$$

Максимальне значення цього коефіцієнта визначається за формулою

$$k_{T.\partial.max} = \frac{T_{\partial.max}}{\bar{T}_{\partial}} = \frac{\bar{T}_{\partial} + T_{\partial.ин.max}}{\bar{T}_{\partial}} = 1 + \frac{T_{\partial.ин.max}}{\bar{T}_{\partial}}. \quad (4.4)$$

Значення $T_{T.\partial.ин.max}$ визначається за формулою

$$T_{\partial.ин.max} = T_{\partial.max} - \bar{T}_{\partial}. \quad (4.5)$$

4.1 Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції інтегрального коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті

За формулою (4.1) для визначення інтегрального коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті необхідно знати величину моментоемності (середнє значення крутного моменту на долоті) та значення загальної енергії цього процесу. Для визначення величини $K_{дин.ин}$ використані значення моментоемності $\bar{T}_{\partial}$ планованого експерименту проведеного на буровому стенді ІФНТУНГ і наведені в [1].

Значення величини E_T для цього ж планового експерименту наведені в підрозділі 3.1.

4.1.1 Емпірична модель коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту $K_{дин.ин}$ для породи твердістю 1440 МПа

Величини коефіцієнту $K_{дин.ин}$, обчислені за формулою (4.1) і за значеннями $\bar{T}_{\partial}$ [1] і E_T (підрозділ 3.1), наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – План чотирифакторного експерименту зі значеннями коефіцієнта $K_{дин.ін}$, одержаними при бурінні в породі твердістю 1440 МПа.

№ дос-ліду	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}$, кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	$\bar{T}_o$, Н·м	E_T , (Н·м) ²	$K_{дин.ін}$
1	82	10	400	0,1	58,68	375,54	0,1091
2	82	15	2500	40	61,25	361,22	0,0963
3	82	20	800	70	64,97	386,48	0,0916
4	82	25	1700	90	77,87	653,42	0,1078
5	133	10	800	90	49,7	215,81	0,0874
6	133	15	1700	70	62,17	430,30	0,1113
7	133	20	400	40	73,07	458,27	0,0858
8	133	25	2500	0,1	77,19	581,11	0,0975
9	188	10	1700	40	40,46	188,58	0,1152
10	188	15	800	0,1	57,87	354,02	0,1057
11	188	20	2500	90	70,81	455,30	0,0908
12	188	25	400	70	83,46	648,27	0,0931
13	285	10	2500	70	34,23	84,24	0,0719
14	285	15	400	90	48,63	195,56	0,0827
15	285	20	1700	0,1	68,22	555,54	0,1194
16	285	25	800	40	74,67	755,1	0,1354

Таблиця 4.2 – Експериментальні значення коефіцієнту $K_{дин.ін}$, усереднені за значеннями режимних параметрів, $p_{III}=1440$ МПа

$F_{ст}$, кН \ n , хв ⁻¹	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	0,1091	0,0874	0,1152	0,0719	0,3836	0,0959
15	0,0963	0,1113	0,1057	0,0827	0,396	0,099
20	0,0916	0,0858	0,0908	0,1194	0,3876	0,0969
25	0,1078	0,0975	0,0931	0,1354	0,4338	0,1084
Сума	0,4048	0,382	0,4048	0,4094	1,601	0,4002
Середнє	0,1012	0,0955	0,1012	0,1024	0,4002	0,1000

У табл. 4.2 і 4.2.1 подано експериментальні значення коефіцієнту $K_{дин.ін}$, усереднені відповідно за $F_{СТ}$, n та C і β .

Таблиця 4.2.1 – Експериментальні значення коефіцієнту $K_{дин.ін}$, усереднені за параметрами бурильного інструменту, $p_{ш}=1440$ МПа

$C, \text{кН/м}$ $\beta, \text{кН·с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	0,1091	0,1057	0,1194	0,0975	0,4317	0,1079
40	0,0858	0,1354	0,1152	0,0963	0,4327	0,1082
70	0,0931	0,0916	0,1113	0,0719	0,3679	0,092
90	0,0827	0,0874	0,1078	0,0908	0,3687	0,0922
Сума	0,3707	0,4201	0,4537	0,3565	1,601	0,4002
Середнє	0,0927	0,1050	0,1134	0,0891	0,4002	0,1000

Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями коефіцієнта $K_{дин.ін}$ зміни крутного моменту на долоті і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведені у табл. 4.3. За цими результатами умови задовільної апроксимації виконуються. Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну багатофакторну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між інтегральним коефіцієнтом оцінки динамічності процесу зміни моменту та змінними чинниками планованого експерименту.

$$K_{дин.ін} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{СТ}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (0,104163 - 0,60109 / n) \times \\ \times F / (8,6603 \cdot F_{СТ} + 21,4963) \times (0,0711628 + 0,0000608 \cdot C - 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) \times \\ \times (0,11277 \cdot e^{-0,002485 \cdot \beta}). \quad (4.6)$$

У табл. 4.4 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{K_{дин.ін.i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (4.7)$$

де $K_{дин.ін.i}$ – експериментальні значення інтегрального коефіцієнта оцінки динамічності процесу зміни моменту за даними табл. 4.1, яка відповідає i -тому досліді; $f(F_{СТ.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того досліді, табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{K}_{дин.ін}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,9993	0,999<P<1,0	0,0032<0,01
	$K_{дин.ін.Е}$	0,101	0,096	0,1012	0,1024			
	$K_{дин.ін} = 0,104163 - 0,60109 / n$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0968	0,0996	0,10097	0,1021			
$F_{СТ}$, кН	10		15	20	25	0,989	0,98<P<0,99	0,0044<0,01
	$K_{дин.ін.Е}$	0,0959	0,099	0,0969	0,1085			
	$K_{дин.ін} = F / (8,6603 \cdot F_{СТ} + 21,4963)$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0925	0,0991	0,1027	0,1050			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9992	0,999<P<1,0	0,001<0,01
	$K_{дин.ін.Е}$	0,0927	0,1050	0,1134	0,0891			
	$K_{дин.ін} = 0,0711628 + 0,0000608 \cdot C - 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0920	0,1061	0,1126	0,0892			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9417	0,9<P<0,95	0,004<0,01
	$K_{дин.ін.Е}$	0,11	0,108	0,092	0,09			
	$K_{дин.ін} = 0,11277 \cdot e^{-0,002485 \cdot \beta}$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,1127	0,1021	0,0948	0,0902			

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта B_i для дослідів 1-16
планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	1175,5707	1102,2667	916,0643	1044,2613	991,2620	1056,3685
№експ.	7	8	9	10	11	12
B_i	892,9845	927,4002	1072,8877	883,4250	1088,3076	1006,8664
№експ.	13	14	15	16		
B_i	900,3020	984,9445	897,3169	1165,9032		

У табл. 4.5 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 98,1639 \cdot \sqrt{17/16} = 177,0738. \quad (4.8)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівня значущості $\alpha=0,1$ та числа степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Отже, інтервал виділення артефактів (829,5594 – 1183,707).

Таблиця 4.5 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
1006,6332	9636,1604	98,1639	1,75 $\alpha=0,1$	-	-	-	-

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнту варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma_B}{B_{CP}} \cdot 100\% = \frac{98,1639}{1006,6332} \cdot 100\% = 9,8\%. \quad (4.8)$$

Це значення знаходиться в інтервалі до 10%, тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення 1006,6332 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

**Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції
буде мати вигляд**

$$K_{\text{дин.ін.м}} = B_{\text{ср}} \cdot f(n) \cdot f(F_{\text{СТ}}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 1006,6332 \cdot (0,104163 - 0,60109 / n) \times \\ \times F / (8,6603 \cdot F_{\text{СТ}} + 21,4963) \times (0,0711628 + 0,0000608 \cdot C - 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) \times \\ \times (0,11277 \cdot e^{-0,002485 \cdot \beta}). \quad (4.9)$$

В табл. 4.6 наведено значення коефіцієнта, визначені за рівнянням багатфакторної моделі $K_{\text{дин.ін.м}}$ та величини відносної похибки (ВП) між ними та експериментальними значеннями $K_{\text{дин.ін.е}}$, наведеними в табл. 4.1.

$$ВП\% = \frac{K_{\text{дин.ін.е}} - K_{\text{дин.ін.м}}}{K_{\text{дин.ін.е}}} \cdot 100 \quad (4.10)$$

Таблиця 4.6 – Експериментальні значення коефіцієнта $K_{\text{дин.ін.е}}$ одержані при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото $F_{\text{СТ}}$, кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компоновки β , кН·с/м	$K_{\text{дин.ін.е}}$	$K_{\text{дин.ін.м}}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	0,1091	0,0935	14,3
2	82	15	2500	40	0,0963	0,0879	8,7
3	82	20	800	70	0,0916	0,1007	-9,9
4	82	25	1700	90	0,1078	0,1039	3,6
5	133	10	800	90	0,0874	0,0888	-1,6
6	133	15	1700	70	0,1113	0,1061	4,7
7	133	20	400	40	0,0858	0,0967	-12,7
8	133	25	2500	0,1	0,0975	0,1058	-8,5
9	188	10	1700	40	0,1152	0,1081	6,2
10	188	15	800	0,1	0,1057	0,1204	-13,9
11	188	20	2500	90	0,0908	0,0840	7,5
12	188	25	400	70	0,0931	0,0931	0
13	285	10	2500	70	0,0719	0,0804	-11,8
14	285	15	400	90	0,0827	0,0845	-2,2
15	285	20	1700	0,1	0,1194	0,1339	-12,1
16	285	25	800	40	0,1354	0,1169	13,7

Середнє значення відносної похибки – $ВП_{\text{ср}} = 8,2\%$.

4.1.2 Емпірична модель коефіцієнту оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту $K_{дин.ін}$ для породи твердістю 2050 МПа

Таблиця 4.7 – План факторного експерименту зі значеннями коефіцієнту $K_{дин.ін}$

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото $F_{СТ}$, кН	Жорсткість бурильного інструменту C , кН/м	Демпфування бурильного інструменту β , кН·с/м	$\bar{T}_o$, Н·м	E_T , (Н·м) ²	$K_{дин.ін.е}$
17	82	10	400	0,1	63,995	267,43	0,0653
18	82	15	2500	40	70,54	363,76	0,0731
19	82	20	800	70	64,9	343,28	0,0815
20	82	25	1700	90	73,61	564,6	0,1042
21	133	10	800	90	39,46	156,02	0,1002
22	133	15	1700	70	59,08	344,15	0,0986
23	133	20	400	40	59,31	277,93	0,079
24	133	25	2500	0,1	83,76	550,69	0,0785
25	188	10	1700	40	47,60	161,8	0,0714
26	188	15	800	0,1	51,99	257,6	0,0953
27	188	20	2500	90	61,43	341,52	0,0905
28	188	25	400	70	71,61	503,6	0,0982
29	285	10	2500	70	38,93	105,34	0,0695
30	285	15	400	90	57,04	195,21	0,06
31	285	20	1700	0,1	58,10	414,89	0,1229
32	285	25	800	40	64,21	544,3	0,132

Таблиця 4.8 – Експериментальні значення коефіцієнта $K_{дин.ін}$, усереднені за значеннями режимних параметрів, $p_{III}=2050$ МПа

$F_{СТ}$, кН \ n , хв ⁻¹	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	0,0653	0,1002	0,0714	0,0695	0,3064	0,0766
15	0,0731	0,0986	0,0953	0,06	0,327	0,0818
20	0,0815	0,079	0,0905	0,1229	0,3739	0,0935
25	0,1042	0,0785	0,0982	0,132	0,4129	0,1032
Сума	0,3241	0,3563	0,3554	0,3844	1,4202	0,35505
Середнє	0,0810	0,0891	0,0889	0,0961	0,35505	0,08876

Таблиця 4.9 – Експериментальні значення коефіцієнту $K_{дин.ін}$, усереднені за параметрами бурильного інструменту, $p_{ш}=2050$ МПа

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	0,0653	0,0953	0,1229	0,0785	0,362	0,0905
40	0,079	0,132	0,0714	0,0731	0,3555	0,089
70	0,0982	0,0815	0,0986	0,0695	0,3478	0,087
90	0,06	0,1002	0,1042	0,0905	0,3549	0,0887
Сума	0,3025	0,409	0,3971	0,3116	1,4202	0,35505
Середнє	0,0756	0,1023	0,0993	0,0779	0,35505	0,08876

У табл. 4.8 і 4.9 подано експериментальні значення коефіцієнта $K_{дин.ін}$, усереднені відповідно за режимними параметрами $F_{СТ}$, n та параметрами бурильного інструменту C і β . Результати підбору частинних емпіричних залежностей за усередненими значеннями коефіцієнта $K_{дин.ін}$ зміни крутного моменту на долоті і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведені у табл. 4.10. За цими результатами умови задовільної апроксимації виконуються. Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну багатофакторну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між інтегральним коефіцієнтом оцінки динамічності процесу зміни моменту та змінними чинниками планованого експерименту.

$$K_{дин.ін} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{СТ}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (-1,838369 / n + 0,1016678) \times \\ \times (0,061535 \cdot e^{0,020558 \cdot F_{СТ}}) \times (0,0547701 + 0,0000713 \cdot C - 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) \times \\ \times (0,00061 / \beta + 0,08815). \quad (4.11)$$

У табл. 4.11 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою (4.7), де $K_{дин.ін.i}$ – експериментальні значення коефіцієнта за даними табл.4.7 які відповідають дослідом 17-32; $f(F_{СТ.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам дослідів 17-32, табл. 4.10.

Таблиця 4.11 – Значення коефіцієнта B_i для дослідів 17-32 планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	1459,964	1630,977	1312,962	1399,134	1787,430	1466,427
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	1386,883	1204,149	1124,548	1371,251	1571,571	1485,391
№експ.	29	30	31	32		
B_i	1429,982	1075,907	1424,639	1595,455		

Таблиця 4.10 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=2050$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{K}_{дин.ін}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,9991	0,999<P<1,0	0,002<0,009
	$K_{дин.ін.Е}$	0,081	0,0981	0,0889	0,0961			
	$K_{дин.ін} = -1,838369 / n + 0,1016678$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0792	0,0878	0,0919	0,0952			
$F_{СТ}$, кН	10		15	20	25	0,9925	0,99<P<0,998	0,0013<0,009
	$K_{дин.ін.Е}$	0,0766	0,0818	0,0935	0,1032			
	$K_{дин.ін} = 0,061535 \cdot e^{0,020558 \cdot F_{СТ}}$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0756	0,0838	0,0928	0,1029			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9322	0,9<P<0,95	0,005<0,009
	$K_{дин.ін.Е}$	0,0756	0,1023	0,0993	0,0779			
	$K_{дин.ін} = 0,0547701 + 0,0000713 \cdot C - 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0793	0,0958	0,10366	0,0766			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9998	0,999<P<1,0	0,0023<0,009
	$K_{дин.ін.Е}$	0,0905	0,089	0,087	0,0887			
	$K_{дин.ін} = 0,00061 / \beta + 0,08815$							
	$K_{дин.ін.ф}$	0,0942	0,08816	0,088159	0,08815			

У табл. 4.12 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$. Значення Δ обчислюється за формулою (4.12)

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 184,2228 \cdot \sqrt{17/16} = 332,3119; \quad (4.12)$$

де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за рівнем значущості $\alpha=0,1$ та числа степенів вільності $\kappa=N-1$; N – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i . Інтервал виділення артефактів (1088,105; 1752,7288).

Таблиця 4.12 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
1420,4169	33938,0354	184,2228	1,75 $\alpha=0,1$	1075,907; 1787,430	1418,8095	19665,2824-	140,233

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації за формулою (4.8) – $K_{BAP} = 9,9\%$.

Це значення менше за 10%, тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення 1418,8095 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

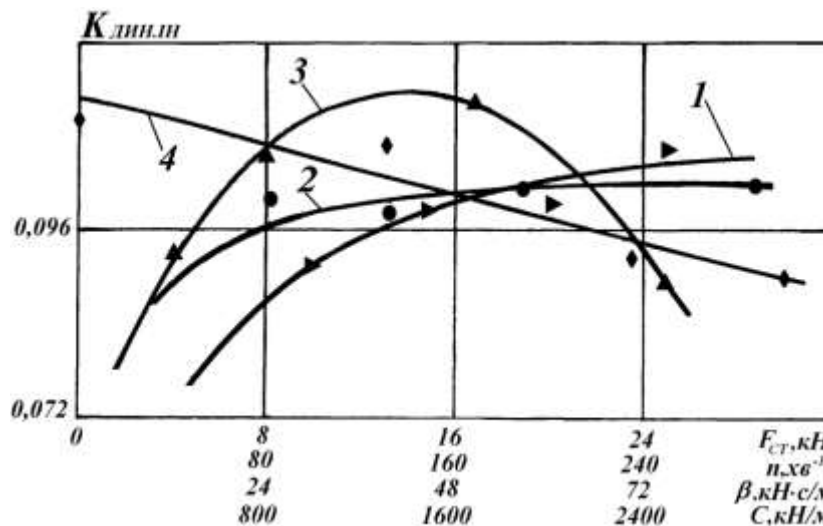
$$\begin{aligned} K_{\text{дин.лн.м}} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = & 1418,8095 \times \\ \times (-1,838369 / n + 0,1016678) \times (0,061535 \cdot e^{0,020558 \cdot F_{CT}}) \times & \\ \times (0,0547701 + 0,0000713 \cdot C - 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) \times & \\ \times (0,00061 / \beta + 0,08815). & \end{aligned} \quad (4.13)$$

В табл. 4.13 наведено значення коефіцієнта, визначені за рівнянням багатфакторної моделі $K_{\text{дин.лн.м}}$, та величини відносної похибки (ВП), визначені за формулою (4.10), між ними та експериментальними значеннями $K_{\text{дин.лн.е}}$, наведеними в табл. 4.7.

Таблиця 4.13 – Експериментальні значення коефіцієнта $K_{\text{дин.ін.е}}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

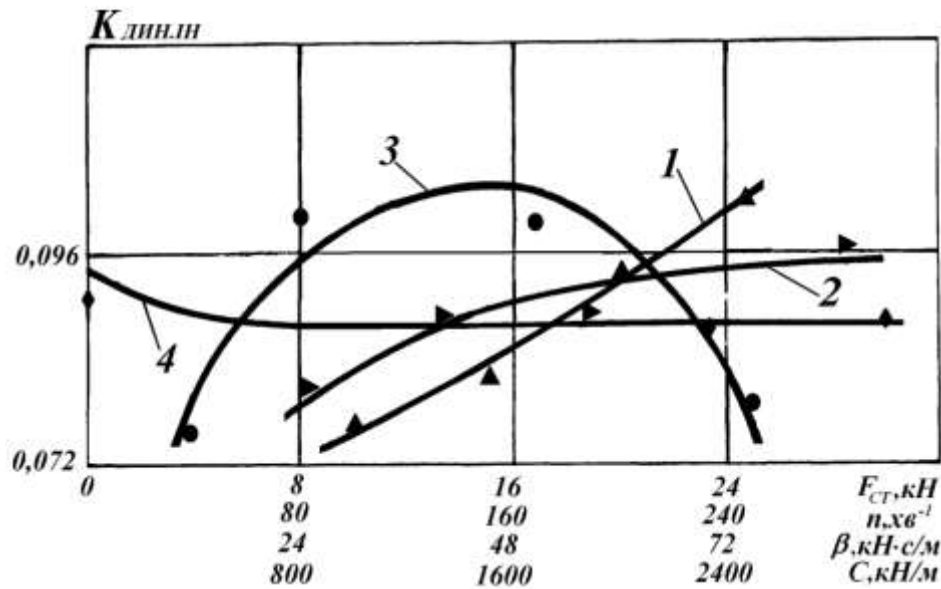
№ досл.	Частота обертання n , хв^{-1}	Осьове статичне навантаження на долото $F_{\text{СТ}}$, кН	Жорсткість компоновки бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компоновки β , кН·с/м	$K_{\text{дин.ін.е}}$	$K_{\text{дин.ін.м}}$	ВП%
17	82	10	400	0,1	0,0653	0,0635	2,8
18	82	15	2500	40	0,0731	0,0636	13
19	82	20	800	70	0,0815	0,0881	-8,1
20	82	25	1700	90	0,1042	0,1057	-1,4
21	133	10	800	90	0,1002	0,0795	20,6
22	133	15	1700	70	0,0986	0,0954	3,2
23	133	20	400	40	0,079	0,0808	-2,3
24	133	25	2500	0,1	0,0785	0,0925	-17,8
25	188	10	1700	40	0,0714	0,0901	-26,2
26	188	15	800	0,1	0,0953	0,0986	-3,5
27	188	20	2500	90	0,0905	0,0817	9,7
28	188	25	400	70	0,0982	0,0938	4,5
29	285	10	2500	70	0,0695	0,069	0,7
30	285	15	400	90	0,06	0,0791	-31,8
31	285	20	1700	0,1	0,1229	0,1224	0,4
32	285	25	800	40	0,132	0,1174	11,1

Середнє значення відносної похибки без відбракованих значень дослідів 21 і 30 – $ВП_{\text{ср}}=7,5$.



$$1(\blacktriangleright) - K_{\text{дин.ін}} = f(F_{\text{СТ}}); 2(\bullet) - K_{\text{дин.ін}} = f(n); 3(\blacktriangle) - K_{\text{дин.ін}} = f(C); \\ 4(\blacklozenge) - K_{\text{дин.ін}} = f(\beta).$$

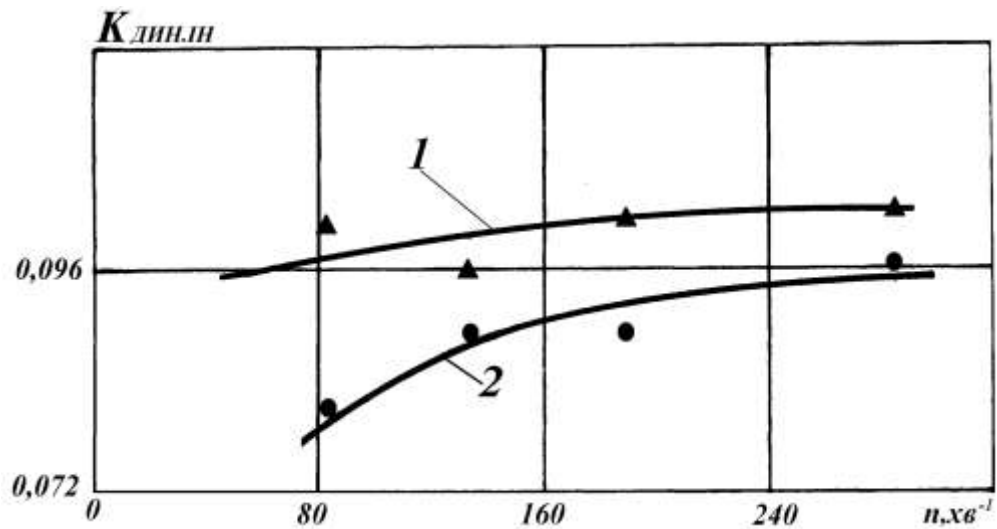
Рисунок 4.1 – Графіки частинних залежностей одержані методом планового експерименту для твердості породи 1440 МПа



$$1(\blacktriangle) - K_{\text{дин.ін}} = f(F_{\text{ст}}); 2(\blacktriangleright) - K_{\text{дин.ін}} = f(n); 3(\bullet) - K_{\text{дин.ін}} = f(C);$$

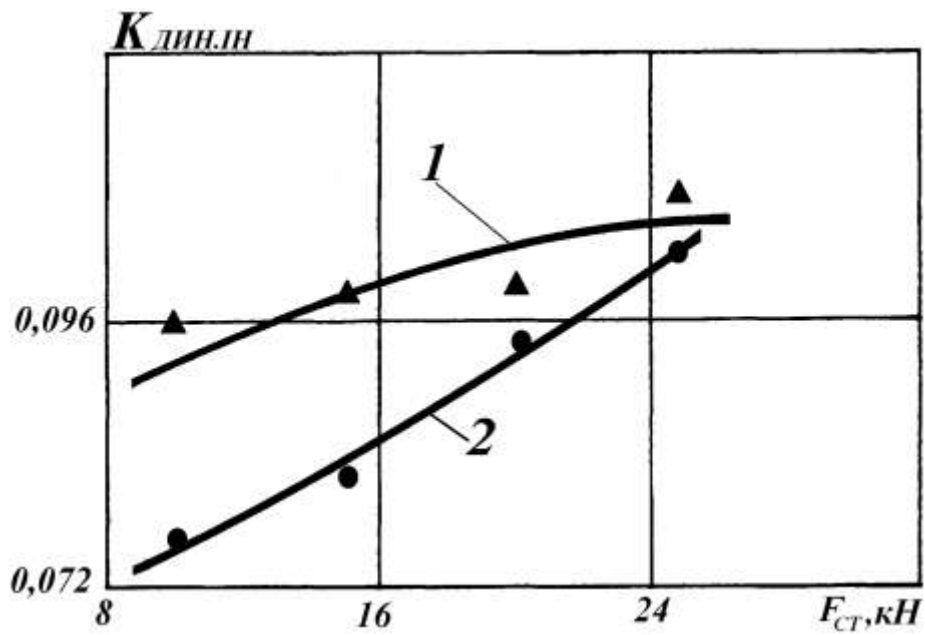
$$4(\blacklozenge) - K_{\text{дин.ін}} = f(\beta)$$

Рисунок 4.2 – Графіки частинних залежностей, одержаних методом планованого експерименту для породи твердістю 2050 МПа



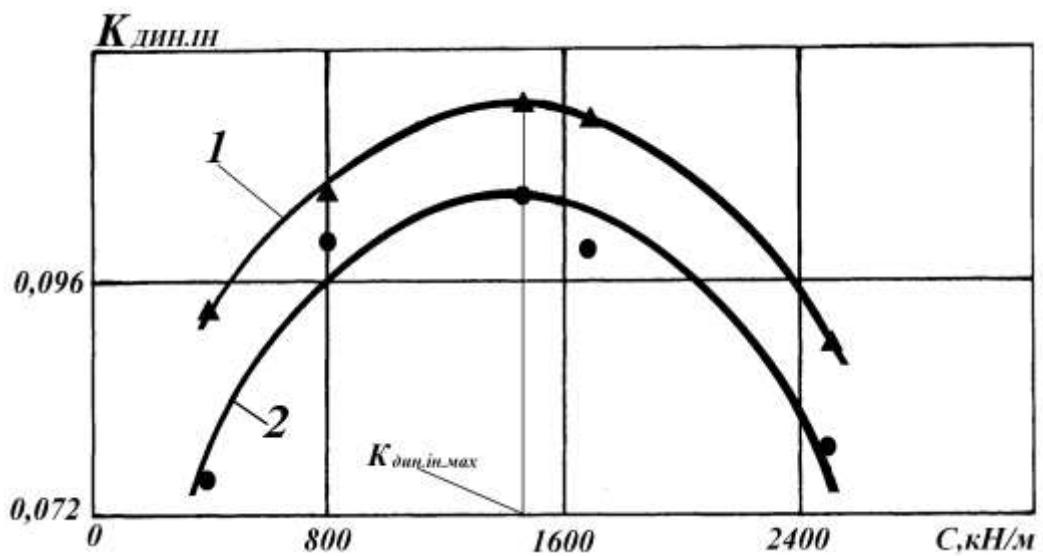
$$1(\blacktriangleright) - p_w = 1440 \text{ МПа}; 2(\bullet) - p_w = 2050 \text{ МПа}$$

Рисунок 4.3 – Графіки частинних залежностей $K_{\text{дин.ін}} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



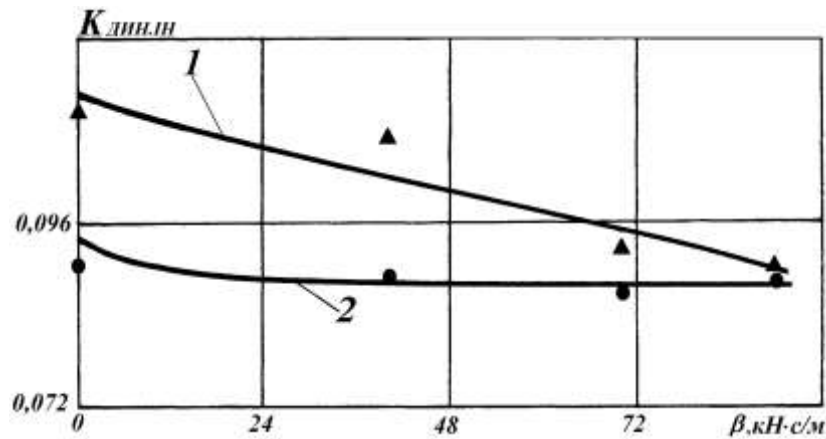
1(►) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 4.4 – Графіки частинних залежностей $K_{\text{дин.лн}} = f(F_{\text{ст}})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(►) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 4.5 – Графіки частинних залежностей $K_{\text{дин.лн}} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(►) – $p_{ш} = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_{ш} = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 4.6 – Графіки частинних залежностей $K_{дин.лн} = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

Частинні емпіричні залежності $E_{т.ф} = f(n)$, рис. 4.1-4.3, незалежно від твердості породи, монотонно зростаючі, тобто при зміні частоти обертання долота в інтервалі $82-285 \text{ хв}^{-1}$ величина коефіцієнта $K_{дин.лн.ф}$ зростає зі значення 0,0968 до значення 0,1021, при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, і із значення 0,0792 до 0,09565, при бурінні в породі твердістю 2050 МПа. В додатку Е, табл. Е.25 і Е.26, наведені 80% і 90% довірчі інтервали значень $K_{дин.лн.ф}$ для всіх рівнів частоти обертання долота. Нерівність $K_{дин.лн.ф.МАХ.i} < K_{дин.лн.ф.МИН.i+1}, i = 1...4$, яка з ймовірністю 0,8 або 0,9 підтверджує або відхиляє вплив частоти обертання на величину за цими інтервалами. Для породи твердістю 1440 МПа підтвердження нерівності, з ймовірністю 0,9, одержано в інтервалі частот $82-188 \text{ хв}^{-1}$ ($0,1003 < 0,1012$) і в інтервалі $188-285 \text{ хв}^{-1}$ ($0,1012 < 0,1018$). Для породи твердістю 2050 МПа ця нерівність з ймовірністю 0,9 підтверджена для всіх рівнів частоти обертання, табл. Е.26 ($0,0807 < 0,0867$; $0,0889 < 0,0894$; $0,09442 < 0,09444$).

Вплив твердості породи на величину коефіцієнта $K_{дин.лн.ф}$ можна оцінити за нерівністю $K_{дин.лн.ф.МИН.1440.i} > K_{дин.лн.ф.МАХ.2050i}, i = 1...4$, якщо нерівність підтверджується, то різні значення $K_{дин.лн.ф}$ – це наслідок впливу твердості гірської породи. За 90%

довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.25 і Е.26, одержані нерівності $0,0933 > 0,0807$; $0,0965 > 0,0889$; $0,1008 > 0,09442$ і $0,1018 > 0,096$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи величина коефіцієнта $K_{\text{дин.ін.ф}}$ на долоті зменшується.

При бурінні в породі твердістю 1440 МПа, рис.4.4, додаток Е, табл. Е.27, за 90% довірчими інтервалами величина значення $K_{\text{дин.ін.ф}}$ із збільшенням осьового навантаження зростає. Нерівність $K_{\text{дин.ін.ф.макс.і}} < K_{\text{дин.ін.ф.мін.і+1}}$, з ймовірністю 0,9, підтверджена для інтервалів 10-15 кН ($0,0953 < 0,099$), 10-20 кН ($0,0953 < 0,0977$) і 10-25 кН ($0,0953 < 0,1021$), тобто причиною зміни $K_{\text{дин.ін.ф}}$ є зростання осьового навантаження на долото.

При бурінні в породі твердістю 2050 МПа, рис.4.4, додаток Е, табл. Е.28, з ймовірністю 0,9, вплив навантаження на $K_{\text{дин.ін.ф}}$ зафіксований на всіх рівнях навантаження ($0,0748 < 0,0855$; $0,0821 < 0,0934$ і $0,0922 < 0,1032$).

Вплив зміни твердості породи з 1440 МПа до 2050 МПа підтверджується всіх рівнів осьового навантаження: $0,0897 > 0,0764$; $0,099 > 0,0855$; $0,0977 > 0,0922$; $0,1021 > 0,1032$, тобто із збільшенням твердості породи коефіцієнт $K_{\text{дин.ін.ф}}$ зменшується.

Частинні емпіричні залежності $K_{\text{дин.ін}} = f(C)$, рис.4.5, для гірської породи твердістю 1440 і 2050 МПа представлені поліномами другого степеня. Особливістю таких залежностей є наявність локального максимуму, який розділяє графік залежності на дві криволінійні ділянки. Перша монотонно зростаюча ділянка – це частина графіка від значення $K_{\text{дин.ін.ф}}$, визначеного для першого рівня жорсткості – $C=400$ кН/м, до значення локального максимуму, друга монотонно спадаюча ділянка – від значення локального максимуму до значення $K_{\text{дин.ін.ф}}$, визначеного для четвертого рівня жорсткості – $C=2500$ кН/м. За цим вплив жорсткості на $K_{\text{дин.ін}}$, для першої ділянки підтверджується нерівністю $K_{\text{дин.ін.ф.макс.і}} < K_{\text{дин.ін.ф.мін.і+1}}$, для другої ділянки – нерівністю $K_{\text{дин.ін.ф.мін.і}} > K_{\text{дин.ін.ф.макс.і+1}}$. При бурінні в породі твердістю

1440 МПа зафіксований локальний максимум $K_{\text{дин.ін.}f.\text{MAX}} = 0,1143$, при $C = 1419 \text{ кН/м}$, за цим для першої ділянки виділяємо три рівні жорсткості: 400, 800 і 1419 кН/м.

За 90% довірчими інтервалами, цей інтервал для локального максимуму становить 0,1135-0,11505, додаток Е, табл. Е.29, одержані нерівності $0,0914 < 0,107$; $0,1052 < 0,1135$. Величина значення $K_{\text{дин.ін.}f}$, в інтервалі 400-1419 кН/м, із збільшенням жорсткості зростає. Для другої ділянки виділяємо три рівні жорсткості: 1419, 1700, 2500 кН/м. Для цієї ділянки одержані нерівності $0,1135 > 0,1133$ і $0,1119 > 0,0893$.

За цими нерівностями, з ймовірністю 0.9, причина зменшення $K_{\text{дин.ін}}$ це наслідок збільшення жорсткості бурильного інструменту.

При бурінні в породі твердістю 2050 МПа зафіксований локальний максимум $K_{\text{дин.ін.}f.\text{MAX}} = 0,1056$, при $C = 1424 \text{ кН/м}$, за цим для першої ділянки виділяємо три рівні жорсткості: 400, 800 і 1424 кН/м, а для другої – 1424, 1700 і 2500 кН/м.

Величина значення $K_{\text{дин.ін.}f}$, в інтервалі 400-1424 кН/м, із збільшенням жорсткості зростає, а в інтервалі 1424-2500 кН/м зменшується із збільшенням жорсткості.

Вплив зміни твердості породи з 1440 МПа до 2050 МПа підтверджується всіх рівнів жорсткості: $0,0914 > 0,0825$; $0,1052 > 0,1011$; $0,119 > 0,1074$; $0,8912 > 0,0777$, тобто із збільшенням твердості породи коефіцієнт $K_{\text{дин.ін.}f}$ зменшується.

Частинна емпірична залежність $K_{\text{дин.ін}} = f(\beta)$, рис. 4.6, для породи твердістю 1440 МПа монотонно спадаюча, тобто із збільшенням коефіцієнту демпфування величина $K_{\text{дин.ін.}f}$, зменшується при переході від одного рівня β до іншого. Якщо таке зменшення відбувається внаслідок зміни величини β то повинна, з ймовірністю 0.9, підтверджуватись нерівність $K_{\text{дин.ін.}f.\text{MIN},i} > K_{\text{дин.ін.}f.\text{MAX},i+1}$. За додатком Е, табл. Е.31, ця нерівність підтверджується 90% довірчими інтервалами для всіх рівнів коефіцієнту β . Для породи твердістю 2050 МПа в вплив коефіцієнту демпфування зафіксований тільки в інтервалі 0-40 кН·с/м, додаток Е, табл. Е.32, в інтервалі

значень 40-90 кН·с/м вплив коефіцієнту демпфування на величину $K_{дин.ін}$ не виявлений. За табл. Е.31 і Е.32, з ймовірністю 0.9, можна стверджувати що із збільшенням твердості гірської породи інтегральний коефіцієнт оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті зменшується.

4.2.Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції максимального коефіцієнта динамічності $k_{T.д.мах}$ процесу зміни крутного моменту на долоті

Значення $k_{T.д.мах}$, обчислене за формулою (4.4) для породи різної твердості, наведено в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 – План факторного експерименту із значеннями максимального коефіцієнта динамічності $k_{T.д.мах}$

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото $F_{ст}$, кН	Жорсткість компонування бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента β , кН·с/м	$k_{T.д.мах}$	
					$p_{ш}$, 1440МПа	$p_{ш}$, 2050МПа
1(17)	82	10	400	0,1	1,9062	2,1293
2(18)	82	15	2500	40	1,1651	1,7038
3(19)	82	20	800	70	2,1343	2,2696
4(20)	82	25	1700	90	1,9063	2,0037
5(21)	133	10	800	90	2,1162	2,2084
6(22)	133	15	1700	70	2,1245	2,3095
7(23)	133	20	400	40	2,3563	2,1643
8(24)	133	25	2500	0,1	1,9334	2,2616
9(25)	188	10	1700	40	2,4436	2,2202
10(26)	188	15	800	0,1	2,856	2,7278
11(27)	188	20	2500	90	2,294	2,3662
12(28)	188	25	400	70	2,4346	2,0492
13(29)	285	10	2500	70	2,3027	2,3441
14(30)	285	15	400	90	2,6975	2,2965
15(31)	285	20	1700	0,1	2,4343	2,1489
16(32)	285	25	800	40	3,0905	3,04

4.2.1 Емпірична модель максимального коефіцієнта динамічності процесу зміни крутного моменту $k_{T.\partial.\max}$ для породи твердістю 1440 МПа

У табл. 4.15 і 4.16 подані експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max}$, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 4.15 – Експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max}$, усереднені за значеннями режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n , ХВ ⁻¹	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	1,9062	2,1162	2,4436	2,3027	8,7687	2,1922
15	1,1651	2,1245	2,856	2,6975	8,8431	2,2108
20	2,1343	2,3563	2,294	2,4343	9,2189	2,3047
25	1,9063	1,9334	2,4346	3,0905	9,3648	2,3412
Сума	7,1119	8,5304	10,0282	10,525	36,1955	
Середнє	1,7780	2,1326	2,5155	2,6312		

Таблиця 4.16 – Експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max}$, усереднені за параметрами бурильного інструменту

C , кН/м \ β , кН·с/м	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	1,9062	2,8560	2,4343	1,9334	9,1299	2,2825
40	2,3563	3,0905	2,4436	1,1651	9,0555	2,2639
70	2,4346	2,1343	2,1245	2,3027	8,9961	2,2490
90	2,6975	2,1162	1,9063	2,2940	9,014	2,2535
Сума	9,3946	10,197	8,9258	7,6952	36,1955	
Середнє	2,3487	2,5493	2,2315	1,9238		

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між коефіцієнтом $k_{T.\partial.\max}$ і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведені у табл. 4.17. За цими результатами умови задовільної апроксимації виконуються. Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між максимальним коефіцієнтом динамічності процесу зміни моменту $k_{T.\partial.\max}$ та змінними чинниками експерименту.

Таблиця 4.17 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440\text{МПа}$

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{k}_{T.\partial.\max}$
n , хВ ⁻¹	82		133	188	285	0,999	0,999<P<1,0	0,068<0,23
	$k_{T.\partial.\max.E}$	1,7780	2,1326	2,5155	2,6312			
	$k_{T.\partial.\max} = -104,3303 / n + 3,00808$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	1,736	2,2236	2,4531	2,6420			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9996	0,999<P<1,0	0,034<0,23
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,1922	2,2108	2,3047	2,3412			
	$k_{T.\partial.\max} = -3,0376 / F_{CT} + 2,45512$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,1514	2,2526	2,3032	2,3336			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9515	0,95<P<0,98	0,08<0,23
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,3487	2,5493	2,2315	1,9238			
	$k_{T.\partial.\max} = 2,3057662 + 0,0003323 \cdot C - 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,4071	2,4451	2,300	1,9015			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,967	0,95<P<0,98	0,0037<0,23
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,2825	2,2639	2,2490	2,2535			
	$k_{T.\partial.\max} = 2,28437 - 0,00362 \sqrt{\beta}$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,2832	2,2615	2,2541	2,2500			

$$k_{T.\partial.\max} = B_{CP} \cdot f(n_\partial) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (3,00808 - 104,3303 / n) \times \\ \times (2,45512 - 3,0376 / F_{CT}) \times (2,3057662 + 0,0003323 \cdot C - 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C^2) \times \\ \times (2,28437 - 0,00362 \sqrt{\beta}). \quad (4.14)$$

У табл. 4.17 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{k_{T.\partial.\max.i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (4.15)$$

де $k_{T.\partial.\max.i}$ – експериментальні значення коефіцієнта динамічності процесу зміни моменту, які відповідають i -тому дослід, табл. 4.14; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід, табл. 4.17.

Таблиця 4.18 – Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6	7
B_i	0,0929	0,0693	0,0968	0,0909	0,0804	0,0818	0,0845
№експ.	8	9	10	11	12	13	14
B_i	0,0858	0,0890	0,0926	0,0949	0,0784	0,0945	0,0837
№експ.	15	16					
B_i	0,0762	0,0907					

У табл. 4.19 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP} - \Delta; B_{CP} + \Delta)$. Значення Δ обчислюється за формулою (4.17), межі інтервалу виділення артефактів – 0,0723-0,1005.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,0078 \cdot \sqrt{17/16} = 0,0141. \quad (4.16)$$

Таблиця 4.19 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
0,0864	0,0001	0,0078	1,75 $\alpha=0,1$	0,0693	0,0875	$4,2 \cdot 10^{-5}$	0,0065

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації за формулою (4.8) $K_{BAP} = 7,4\%$. Це значення знаходиться в інтервалі до 10% тобто сукупність однорідна незначної мінливості і середнє значення 0,0875 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$k_{T.\partial.ma.x.M} = 0,0875 \cdot (3,00808 - 104,3303 / n) \times (2,45512 - 3,0376 / F_{CT}) \times (2,3057662 + 0,0003323 \cdot C - 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C^2) \times (2,28437 - 0,00362 \sqrt{\beta}). \quad (4.17)$$

В табл. 4.20 наведено значення $k_{T.\partial.max.M}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими і експериментальними значеннями планованого експерименту $k_{T.\partial.max.E}$, знайдені за формулою

$$ВП\% = \frac{k_{T.\partial.max.E} - k_{T.\partial.max.M}}{k_{T.\partial.max.E}} \cdot 100 \quad (4.18)$$

Таблиця 4.20 – Експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.max.E}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, порода твердістю 1440 МПа

№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне наванта- ження на долото $F_{CT}, \text{кН}$	Жорсткість компонування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	$k_{T.\partial.max.E}$	$k_{T.\partial.max.M}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	1,9062	1,7967	5,7
2	82	15	2500	40	1,1651	1,4706	-26,2
3	82	20	800	70	2,1343	1,9273	9,7
4	82	25	1700	90	1,9063	1,8344	3,8
5	133	10	800	90	2,1162	2,3026	-8,8
6	133	15	1700	70	2,1245	2,2727	-7,0
7	133	20	400	40	2,3563	2,4373	-3,4
8	133	25	2500	0,1	1,9334	1,9707	-1,9
9	188	10	1700	40	2,4436	2,4038	1,6
10	188	15	800	0,1	2,856	2,7006	5,4
11	188	20	2500	90	2,294	2,1135	7,9
12	188	25	400	70	2,4346	2,7174	1,2
13	285	10	2500	70	2,3027	2,1341	7,3
14	285	15	400	90	2,6975	2,8226	-4,6
15	285	20	1700	0,1	2,4343	2,7955	-14,8
16	285	25	800	40	3,0905	2,9863	3,4

Середнє значення відносної похибки без відбракованих результатів другого дослід: $ВП_{CP}=5,8\%$.

4.2.2 Емпірична модель максимального коефіцієнта динамічності процесу зміни крутного моменту $k_{T.\partial.\max}$ для породи твердістю 2050 МПа

У табл. 4.21 і 4.22 подані експериментальні значення коефіцієнта $k_{T.\partial.\max}$, усереднені відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 4.21 – Експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max}$, усереднені за значеннями режимних параметрів

F_{CT} , кН \ n , хВ ⁻¹	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	2,1293	2,2084	2,2202	2,3441	8,902	2,2255
15	1,7038	2,3095	2,7278	2,2965	9,0376	2,2594
20	2,2696	2,1643	2,3662	2,1489	8,949	2,2373
25	2,0037	2,2616	2,0492	3,04	9,3545	2,3386
Сума	8,1064	8,9438	9,3664	9,8295	36,2431	9,0608
Середнє	2,0266	2,23595	2,3408	2,45738	9,0608	2,2652

Таблиця 4.22 – Результати експерименту з визначення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max}$, усереднені за параметрами бурильного інструменту

C , кН/м \ β , кН·с/м	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	2,1293	2,7278	2,1489	2,2616	9,2676	2,3169
40	2,1643	3,04	2,2202	1,7038	9,1283	2,28208
70	2,0492	2,2696	2,3095	2,3441	8,9724	2,2431
90	2,2965	2,2084	2,0037	2,3662	8,8748	2,2187
Сума	8,6393	10,2458	8,6823	8,6757	36,2431	9,0608
Середнє	2,1598	2,5614	2,17057	2,1689	9,0608	2,2652

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між максимальним коефіцієнтом динамічності процесу зміни моменту $k_{T.\partial.\max}$ і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведені у табл. 4.23.

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між коефіцієнтом динамічності процесу зміни моменту $k_{T.\partial.\max}$ та змінними чинниками експерименту.

Таблиця 4.23 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=2050$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{k}_{T.\partial.\max}$
n , хв ⁻¹	82		133	188	285	0,99998	0,999<P<1,0	0,062<0,226
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,0266	2,23595	2,3408	2,45738			
	$k_{T.\partial.\max} = n / (0,3722 \cdot n + 10,0402)$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,0217	2,2337	2,3496	2,4544			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9988	0,998<P<0,999	0,04<0,226
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,2255	2,2594	2,2373	2,3386			
	$k_{T.\partial.\max} = 2,3897 - 1,9805 / F_{CT}$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,1916	2,2577	2,2907	2,3105			
C , кН/м	400		800	1700	2500	1,0	P=1	$1,1 \cdot 10^{-14} < 0,226$
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,1598	2,5614	2,171	2,1689			
	$k_{T.\partial.\max} = 1,0520838 + 0,0038591 \cdot C - 2,98353 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 6,4743 \cdot 10^{-10} \cdot C^3$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,1598	2,5614	2,171	2,1689			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,9966	0,99<P<0,998	0,004<0,226
	$k_{T.\partial.\max.E}$	2,3169	2,2821	2,2431	2,2187			
	$k_{T.\partial.\max} = 2,32051 \cdot e^{-0,000485 \cdot \beta}$							
	$k_{T.\partial.\max.f}$	2,3204	2,2759	2,24305	2,2214			

$$k_{T.0.\max} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot n / (0,3722 \cdot n + 10,0402) \times \\ \times (2,3897 - 1,9805 / F_{CT}) \times (1,0520838 + 0,0038591 \cdot C - 2,98353 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + (4.19) \\ + 6,4743 \cdot 10^{-10} \cdot C^3) \times (2,32051 \cdot e^{-0,000485 \cdot \beta}).$$

У табл. 4.24 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою (4.15), де $k_{T.0.\max.i}$ – експериментальні значення коефіцієнта динамічності процесу зміни моменту, які відповідають i -тому дослід, табл. 4.14; $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід, табл. 4.23.

Таблиця 4.24 – Значення коефіцієнта B_i для всіх дослідів планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	0,0959	0,0756	0,0850	0,0899	0,0797	0,094
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	0,086	0,0871	0,0873	0,0865	0,0912	0,0779
№експ.	29	30	31	32		
B_i	0,0896	0,0864	0,0759	0,092		

У табл. 4.25 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$. Значення Δ обчислюється за формулою (4.20), межі інтервалу виділення артефактів 0,075-0,0974.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,0062 \cdot \sqrt{17/16} = 0,0112. \quad (4.20)$$

Таблиця 4.25 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
0,0862	0,000038	0,0062	1,75 $\alpha=0,1$	Відс.	-	-	-

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації за формулою (4.13) $K_{BAP} = 7,2\%$. Це значення знаходиться в інтервалі від 0% до 10% тобто сукупність однорідна незначної мінливості і середнє значення 0,0862 є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Рівняння багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$k_{T.\partial.\max} = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 0,0862 \cdot n / (0,3722 \cdot n + 10,0402) \times \\ \times (2,3897 - 1,9805 / F_{CT}) \times (1,0520838 + 0,0038591 \cdot C - 2,98353 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + \\ + 6,4743 \cdot 10^{-10} \cdot C^3) \times (2,32051 \cdot e^{-0,000485 \cdot \beta}). \quad (4.21)$$

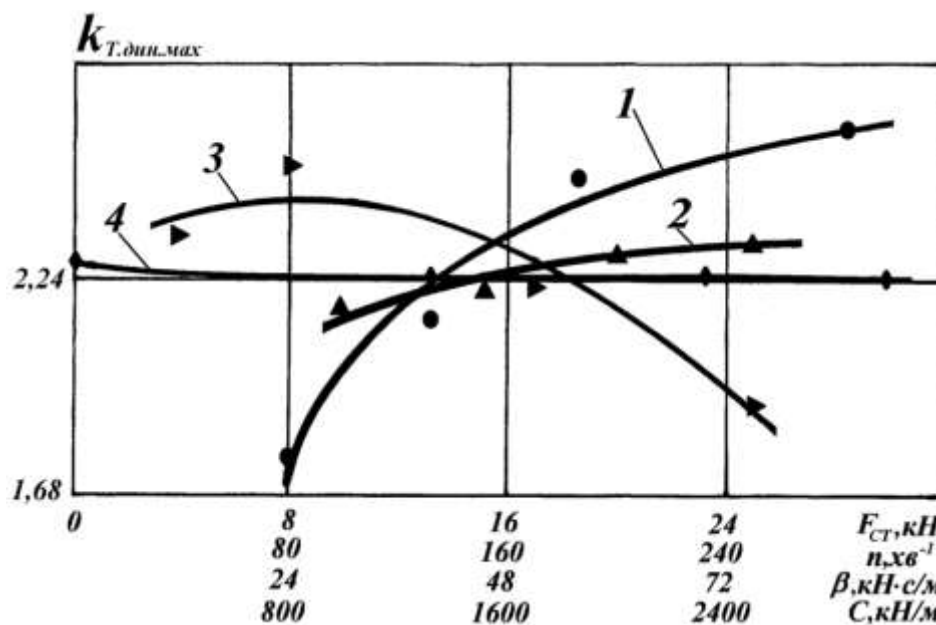
В табл. 4.26 наведено значення $k_{T.\partial.\max.M}$, визначені за рівнянням багатофакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $k_{T.\partial.\max.E}$, знайденої за рівнянням 4.18.

Таблиця 4.26 – Експериментальні значення коефіцієнту $k_{T.\partial.\max.E}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ доп.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компоновки бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компоновки β , кН·с/м	$k_{T.\partial.\max.E}$	$k_{T.\partial.\max.M}$	ВП%
17	82	10	400	0,1	2,1293	1,9156	10,0
18	82	15	2500	40	1,7038	1,9414	-13,9
19	82	20	800	70	2,2696	2,2926	-1,0
20	82	25	1700	90	2,0037	1,9414	3,1
21	133	10	800	90	2,2084	2,4011	-8,7
22	133	15	1700	70	2,3095	2,1179	8,3
23	133	20	400	40	2,1643	2,4171	-11,7
24	133	25	2500	0,1	2,2616	2,2390	1,0
25	188	10	1700	40	2,2202	2,1934	1,2
26	188	15	800	0,1	2,7278	2,7196	0,3
27	188	20	2500	90	2,3662	2,2332	5,6
28	188	25	400	70	2,0492	2,2684	-10,7
29	285	10	2500	70	2,3441	2,2565	3,7
30	285	15	400	90	2,2965	2,2926	0,2
31	285	20	1700	0,1	2,1489	2,4419	-13,6
32	285	25	800	40	3,04	2,8543	6,1

Середнє значення відносної похибки $ВП_{CP}=6,2\%$.

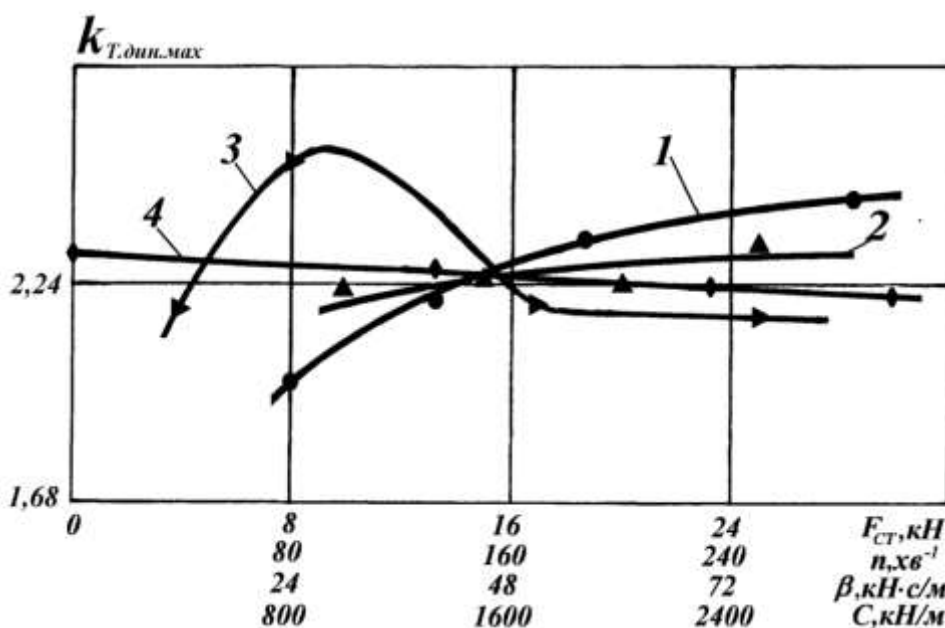
За вказаним вище матеріалом доцільно графічно представити частинні залежності $k_{T.\partial.\max} = f(n)$ і $k_{T.\partial.\max} = f(C)$ для більш чіткого розуміння процесу їх зміни для порід різної твердості.



$$1(\bullet) - k_{T,дин.мах} = f(n); 2(\blacktriangle) - k_{T,дин.мах} = f(F_{CT}); 3(\blacktriangleright) - k_{T,дин.мах} = f(C);$$

$$4(\blacklozenge) - k_{T,дин.мах} = f(\beta)$$

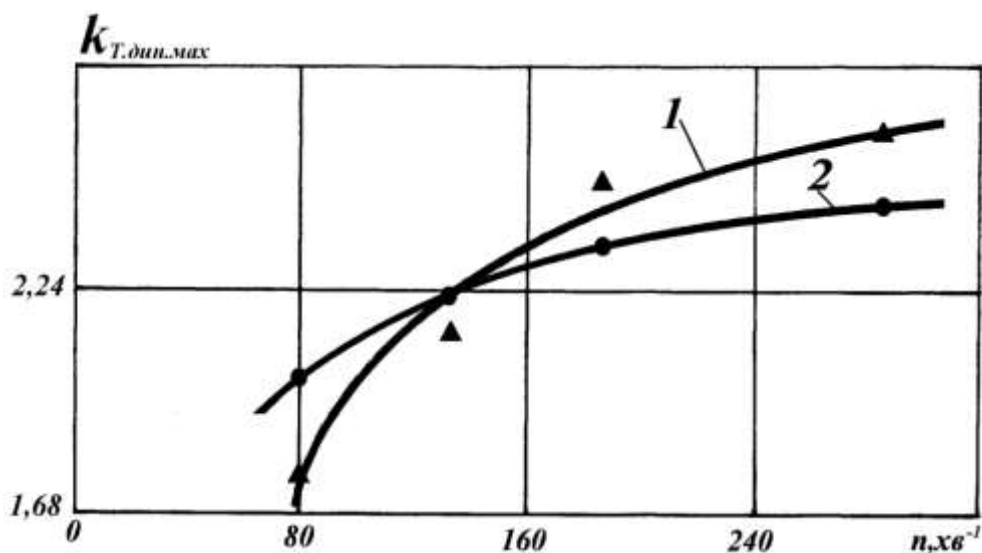
Рисунок 4.7 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 1440 МПа



$$1(\bullet) - k_{T,дин.мах} = f(n); 2(\blacktriangle) - k_{T,дин.мах} = f(F_{CT}); 3(\blacktriangleright) - k_{T,дин.мах} = f(C);$$

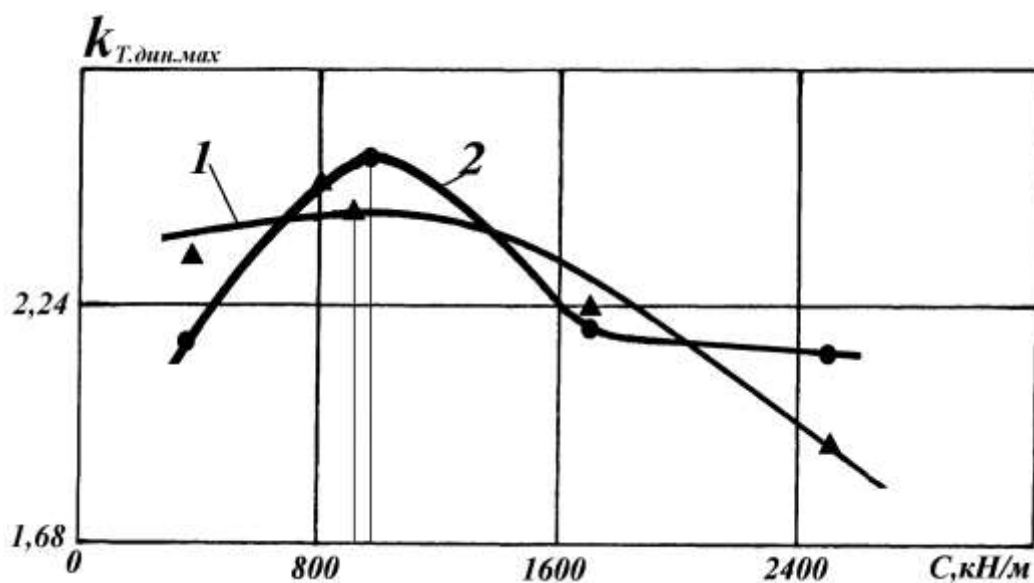
$$4(\blacklozenge) - k_{T,дин.мах} = f(\beta)$$

Рисунок 4.8 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 2050 МПа



$$1(\blacktriangleright) - p_u = 1440 \text{ МПа} ; 2(\bullet) - p_u = 2050 \text{ МПа}$$

Рисунок 4.9 – Графіки частинних залежностей $k_{T,дин..max} = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю прошарків пісковика воротищенської світи



$$1(\blacktriangleright) - p_u = 1440 \text{ МПа} ; 2(\bullet) - p_u = 2050 \text{ МПа}$$

Рисунок 4.10 – Графіки частинних залежностей $k_{T,дин..max} = f(C)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різних за твердістю прошарків пісковика воротищенської світи

Частинні емпіричні залежності $k_{T.\partial.\max.f} = f(n)$, рис. 4.9, для обох прошарків монотонно зростаючі. Можна стверджувати що нерівність $k_{T.\partial.\max.f.\max.i} < k_{T.\partial.\max.f.\min.i+1}$, $i = 1...4$, незалежно від твердості породи, з ймовірністю 0.9, додаток Е, табл. 33 і Е.34, підтверджується, тобто із збільшенням частоти обертання долота інтенсивність динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті зростає. Вплив твердості породи на величину коефіцієнта $k_{T.\partial.\max.f}$, з ймовірністю 0.9, додаток Е, табл. 33 і Е.34, підтверджується виконанням нерівності $k_{T.\partial.\max.f.\min.1440.i} > k_{T.\partial.\max.f.\max.2050.i}$, тільки в інтервалі 188-285 хв⁻¹. Різниця між значеннями $k_{T.\partial.\max.f.i}$ на частотах 82 і 133 хв⁻¹, одержаних при бурінні в породі різної твердості, знаходиться в межах випадкової похибки експериментальних досліджень.

Частинні емпіричні залежності, $k_{T.\partial.\max.f} = f(F)$ рис. 4.7 і 4.8, для обох прошарків монотонно зростаючі. Можна стверджувати що нерівність $k_{T.\partial.\max.f.\max.i} < k_{T.\partial.\max.f.\min.i+1}$, $i = 1...4$, для твердості породи 1440 МПа, з ймовірністю 0.9, додаток Е, табл. 35, підтверджується, тобто із збільшенням осьового навантаження інтенсивність динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті зростає. Для породи твердістю 2050МПа нерівність впливу навантаження на коефіцієнт $k_{T.\partial.\max.f.i}$, з ймовірністю 0.9, підтверджена тільки в діапазонах 10-15 кН і 15-25 кН, додаток Е, табл. 36. Вплив твердості породи на величину коефіцієнта $k_{T.\partial.\max.f}$, з ймовірністю 0.9, додаток Е, табл.35 і Е.36, підтверджується виконанням нерівності $k_{T.\partial.\max.f.\min.1440.i} > k_{T.\partial.\max.f.\max.2050.i}$, тільки при навантаженні 25 кН, для всіх інших рівнів: 10, 15 і 20 кН, різниця між значеннями $k_{T.\partial.\max.f.i}$, одержаних при бурінні в породі різної твердості, знаходиться в межах випадкової похибки експериментальних досліджень.

Частинна емпірична залежність $k_{T.\partial.\max} = f(\beta)$, рис. 4.7, для породи твердістю 1440 МПа монотонно спадаюча, тобто із збільшенням коефіцієнту демпфування величина $k_{T.\partial.\max.f}$ зменшується при переході від одного рівня β до іншого. Якщо

таке зменшення відбувається внаслідок зміни величини β то повинна, з ймовірністю 0.9, підтверджуватись нерівність $k_{T.\partial.max.f_{min.i}} > k_{T.\partial.max.f_{max.i+1}}$. За додатком Е, табл. Е.37, ця нерівність підтверджується 90% довірчими інтервалами тільки в діапазоні значень 40-70 кН·с/м. В інших діапазонах зміни значення β , його вплив на величину $k_{T.\partial.max.f}$ не виявлений. Для породи твердістю 2050 МПа вплив коефіцієнту демпфування, ймовірністю 0.9, зафіксований на всіх рівнях β , додаток Е, табл. Е.38. Вплив твердості породи на величину коефіцієнту $k_{T.\partial.max.f}$ при зміні коефіцієнту демпфування бурильного інструменту підтверджений тільки для значень 70 і 90 кН·с/м. Аналогічно залежностям $K_{дин.ин} = f(C)$, рис.4.5, особливістю залежностей $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ є наявність локального максимуму, який розділяє графік залежності на дві криволінійні ділянки. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа перша монотонно зростаюча ділянка – це частина графіка від значення $k_{T.\partial.max.f} = 2,4071$ визначеного для першого рівня жорсткості – $C=400$ кН/м, до значення локального максимуму, $k_{T.\partial.max.f_{max}} = 2,5814$, при $C = 841$ кН / м, друга монотонно спадаюча ділянка – від значення локального максимуму до значення $k_{T.\partial.max.f} = 1,9015$, визначеного для четвертого рівня жорсткості – $C=2500$ кН/м. За цим для першої ділянки виділяємо два рівні жорсткості: 400 і 841 кН/м, для другої – три рівні: 841, 1700 і 2500 кН/м. За 90% довірчими інтервалами для значень $k_{T.\partial.max.f}$: 2,4071 і 2,5814, додаток Е, табл. Е.38, нерівність впливу жорсткості на величину $k_{T.\partial.max.f}$ не підтверджена, $k_{T.\partial.max.f_{max.400}} < k_{T.\partial.max.f_{min.841}} - 2,4569 > 2,3595$. Для другої ділянки, за 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.38, нерівність $k_{T.\partial.max.f_{min.i}} > k_{T.\partial.max.f_{max.i+1}}$, підтверджена для всіх рівнів жорсткості: одержані нерівності $2,3595 > 2,3586$ і $2,2414 > 1,9202$. За наведеним вище матеріалом вплив жорсткості на процес зміни $k_{T.\partial.max.f}$ підтверджений тільки для другої ділянки. Емпірична частинна залежність $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ для породи твердості 2050 МПа, апроксимована поліномом третього степеня,

$$k_{T.\partial.max} = 1,2373168 + 0,0034588 \cdot C - 2,72196 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 5,94907 \cdot 10^{-10} \cdot C^3,$$

за яким точкове значення 2,5814 локального максимуму, одержане для жорсткості 925 кН/м. За цими рівнянням основна похибка практично відсутня, і становить $\sigma_0=1,1 \cdot 10^{-14}$. Значення експериментальних даних і значення, обчислені за поліномом третього ступеня, практично співпадають, тобто між цими значеннями випадкова похибка відсутня. Для першої ділянки, $C=400-925$ кН/м, цієї залежності із збільшенням жорсткості значення $k_{T.d.max.f}$ зростають (2,2234-2,5814), для другої ділянки, $C=925-2500$ кН/м, зменшуються.

4.3. Багатофакторна емпірична модель множинної нелінійної кореляції подвійної амплітуди $2A_T$ процесу зміни крутного моменту на долоті

Значення подвійної амплітуди коливного процесу зміни крутного моменту на долоті, яка представляє собою різницю між найбільшим і найменшим значеннями записаної (зафіксованої) реалізації, одержані за результатами факторного експерименту наведено в табл.4.27.

4.3.1 Емпірична модель подвійної амплітуди процесу зміни крутного моменту $2A_T$ для породи твердістю 1440 МПа

Таблиця 4.27 – План факторного експерименту зі значеннями $2A_T$ процесу зміни крутного моменту

№ досл.	Частота обертання $n, \text{хв}^{-1}$	Осьове статичне навантаження на долото $F_{CT}, \text{кН}$	Жорсткість компонування бурильного інструмента $C, \text{кН/м}$	Коефіцієнт демпфування компонування бурильного інструмента $\beta, \text{кН} \cdot \text{с/м}$	$2A_T, \text{Н} \cdot \text{м}$	
					$p_{ш},$ 1440МПа	$p_{ш},$ 2050МПа
1(17)	82	10	400	0,1	112,26	121,76
2(18)	82	15	2500	40	112,6	104,3
3(19)	82	20	800	70	117,58	146,15
4(20)	82	25	1700	90	190,65	160,76
5(21)	133	10	800	90	104,5	93,67
6(22)	133	15	1700	70	156,18	137,51

Продовження табл. 4.27

7(23)	133	20	400	40	174,05	145,26
8(24)	133	25	2500	0,1	161,76	174,6
9(25)	188	10	1700	40	114,6	114,92
10(26)	188	15	800	0,1	168,7	130,87
11(27)	188	20	2500	90	151,42	161,42
12(28)	188	25	400	70	173,05	167,63
13(29)	285	10	2500	70	131,01	93
14(30)	285	15	400	90	125,15	127,55
15(31)	285	20	1700	0,1	167,4	141,5
16(32)	285	25	800	40	205,93	202,61

Таблиця 4.28 – Експериментальні значення $2A_r$, усереднені за режимними параметрами

$F_{CT}, \text{кН}$ \ $n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	112,26	104,5	114,6	131,01	462,37	115,59
15	112,6	156,18	168,7	125,15	562,63	140,66
20	117,58	174,05	151,42	167,4	610,45	152,61
25	190,65	161,76	173,05	205,93	731,39	182,85
Сума	533,09	596,49	607,77	629,49	2366,84	591,71
Середнє	133,27	149,12	151,94	157,37	591,71	147,9275

Таблиця 4.29 – Експериментальні значення $2A_r$, усереднені за параметрами бурильного інструменту

$C, \text{кН/м}$ \ $\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	112,26	168,7	167,4	161,76	610,12	152,53
40	174,05	205,93	114,6	112,6	607,18	151,80
70	173,05	117,58	156,18	131,01	577,82	144,46
90	125,15	104,5	190,65	151,42	571,72	142,43
Сума	584,51	596,71	628,83	556,79	2366,84	591,71
Середнє	146,13	149,18	157,21	139,20	591,71	147,9275

Таблиця 4.30 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=1440$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
n , хВ ⁻¹	82		133	188	285	0,9999	0,999<P<1,0	1,62<14,8
	$2\bar{A}_{T.E}$	133,27	149,12	151,94	157,37			
	$2A_T = -2575,3952 / n + 166,39223$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	134,98	147,03	152,69	157,36			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,9924	0,99<P<0,998	4,0<14,8
	$2\bar{A}_{T.E}$	115,59	140,66	152,61	182,85			
	$2A_T = 87,63235 \cdot e^{0,029148F_{CT}}$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	117,29	135,69	156,98	181,61			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9398	0,9<P<0,95	2,45<14,8
	$2\bar{A}_{T.E}$	146,13	149,18	157,21	139,20			
	$2A_T = 132,1721611 +$ $+0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	144,35	152,37	155,21	140,05			
β , кН·с/ м	0,1		40	70	90	0,9277	0,9<P<0,95	1,9<14,8
	$2\bar{A}_{T.E}$	152,53	151,8	144,46	142,43			
	$2A_T = -0,11713 \cdot \beta + 153,78956$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	153,78	149,10	145,59	143,25			

У табл. 4.28 і 4.29 подано результати факторного експерименту при бурінні в породі твердістю 1440 МПа з визначення значень $2A_T$ усереднених відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β . Результати підбору частинних емпіричних залежностей між значеннями $2A_T$ і змінними чинниками, та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 4.30.

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між величиною $2A_T$ та змінними чинниками експерименту.

$$2A_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (-2575,3952 / n + 166,39223) \times \\ \times (87,63235 \cdot e^{0,029148 F_{CT}}) \times (132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2) \times \\ \times (153,78956 - 0,11713 \cdot \beta). \quad (4.22)$$

У табл. 4.31 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою

$$B_i = \frac{2A_{T,i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \quad (4.23)$$

де $2A_{T,i}$ – експериментальні значення подвійної амплітуди зміни моменту, які відповідають i -тому дослід, табл. 4.27; $f(F_{CT,i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід і подані у табл. 4.30.

Таблиця 4.31 – Значення коефіцієнта B_i для дослідів 1-16 планованого експерименту

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$3,1943 \cdot 10^{-7}$	$2,9441 \cdot 10^{-7}$	$2,5014 \cdot 10^{-7}$	$3,4979 \cdot 10^{-7}$	$2,6567 \cdot 10^{-7}$	$3,4643 \cdot 10^{-7}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
B_i	$3,5037 \cdot 10^{-7}$	$2,8128 \cdot 10^{-7}$	$2,7651 \cdot 10^{-7}$	$3,4750 \cdot 10^{-7}$	$3,1488 \cdot 10^{-7}$	$2,9694 \cdot 10^{-7}$
№експ.	13	14	15	16		
B_i	$3,4812 \cdot 10^{-7}$	$2,8345 \cdot 10^{-7}$	$2,8392 \cdot 10^{-7}$	$3,1614 \cdot 10^{-7}$		

У табл. 4.32 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$. Значення Δ обчислюється за формулою (4.25), межі інтервалу виділення артефактів: $2,4752 \cdot 10^{-7} - 3,6812 \cdot 10^{-7}$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,3343 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{17/16} = 0,6030 \cdot 10^{-7} \quad (4.24)$$

Величина коефіцієнта варіації за формулою (4.8) $K_{BAP} = 10,9\%$.

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,0782 \cdot 10^{-7}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Таблиця 4.32 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,0782 \cdot 10^{-7}$	$1,2369 \cdot 10^{-15}$	$0,3343 \cdot 10^{-7}$	1,75 $\alpha=0,1$	Відс.	-	-	-

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$\begin{aligned} 2A_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = & 3,0782 \cdot 10^{-7} \cdot (-2575,3952 / n + 166,39223) \times \\ & \times (87,63235 \cdot e^{0,029148 F_{CT}}) \times (132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2) \times \\ & \times (153,78956 - 0,11713 \cdot \beta). \end{aligned} \quad (4.25)$$

В табл. 4.33 наведено значення $2A_{T.M}$, визначені за рівнянням багатofакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $2A_{T.E}$, обчислені за формулою

$$ВП\% = \frac{2A_{T.E} - 2A_{T.M}}{2A_{T.E}} \cdot 100. \quad (4.26)$$

Таблиця 4.33 – Експериментальні значення коефіцієнту $2A_{T.E}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, твердість породи 1440МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компоновки бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компоновки β , кН·с/м	$2A_{T.E}$	$2A_{T.M}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	112,26	108,2	3,6
2	82	15	2500	40	112,6	117,71	-4,5
3	82	20	800	70	117,58	144,72	-23,1
4	82	25	1700	90	190,65	167,75	12,0
5	133	10	800	90	104,5	115,85	-10,9
6	133	15	1700	70	156,18	138,78	11,1
7	133	20	400	40	174,05	152,92	12,1
8	133	25	2500	0,1	161,76	177,01	-9,4
9	188	10	1700	40	114,6	127,57	-11,3
10	188	15	800	0,1	168,7	149,43	11,4
11	188	20	2500	90	151,42	147,99	2,3
12	188	25	400	70	173,05	179,38	3,7
13	285	10	2500	70	131,01	115,85	11,6
14	285	15	400	90	125,15	135,9	-8,6
15	285	20	1700	0,1	167,4	181,5	-8,4
16	285	25	800	40	205,93	200,53	2,6

Середнє значення відносної похибки $ВП_{CP} = 9,2\%$.

4.3.2 Емпірична модель подвійної амплітуди процесу зміни крутного моменту

$2A_T$ для породи твердістю 2050 МПа

У табл. 4.34 і 4.35 подано результати факторного експерименту при бурінні в породі твердістю 2050 МПа з визначення значень $2A_T$ усереднених відповідно за режимними параметрами F_{CT} , n та параметрами бурильного інструменту C і β .

Таблиця 4.34 – Результати експерименту із значеннями $2A_T$, усередненими за режимними параметрами

n , хв ⁻¹ F_{CT} , кН	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	121,76	93,67	114,92	93	423,35	≈105,84

15	104,3	137,51	130,87	127,55	500,23	≈125,06
20	146,15	145,26	161,42	141,5	594,33	≈148,58
25	160,76	174,6	167,63	202,61	705,6	176,4
Сума	532,97	551,04	574,84	564,66	2223,51	≈555,88
Середнє	≈133,24	137,76	143,71	≈141,17	≈555,88	138,97

Таблиця 4.35 – Результати експерименту із значеннями $2A_T$, усередненими за параметрами бурильного інструмента

$\begin{matrix} C, \text{кН/м} \\ \beta, \text{кН}\cdot\text{с/м} \end{matrix}$	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	121,76	130,87	141,5	174,6	568,73	142,1825
40	145,26	202,61	114,92	104,3	567,09	141,7725
70	167,63	146,15	137,51	93	544,29	136,07
90	127,55	93,67	160,76	161,42	543,4	135,85
Сума	562,2	573,3	554,69	533,32	2223,51	
Середнє	140,55	143,32	138,67	133,33		

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між величиною $2A_T$ і змінними чинниками та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведені у табл. 4.36.

Отже, на основі експериментальних даних одержимо наступну емпіричну модель множинної нелінійної кореляції між величиною $2A_T$ та змінними чинниками експерименту

$$2A_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = B_{CP} \cdot (n / (0,00689 \cdot n + 0,042)) \times \\ \times (75,1486 \cdot e^{0,034096 F_{CT}}) \times (139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2) \times \\ \times (-0,08082 \cdot \beta + 143,0107). \quad (4.27)$$

У табл. 4.37 наведені значення коефіцієнта B_i , визначенні за формулою (4.23) і за значеннями, наведеними у табл. 4.27 і 4.36.

Таблиця 4.36 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних, $p_{ш}=2050$ МПа

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$
n , хВ ⁻¹	82		133	188	285	0,9995	0,999<P<1,0	2,25<13,9
	$2\bar{A}_{T.E}$	133,24	137,76	143,71	141,17			
	$2A_T = n / (0,00689 \cdot n + 0,042)$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	135,1	138,78	140,58	142,1			
F_{CT} , кН	10		15	20	25	0,99997	0,999<P<1,0	0,2<13,9
	$2\bar{A}_{T.E}$	105,84	125,06	148,58	176,4			
	$2A_T = 75,1486 \cdot e^{0,034096 F_{CT}}$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	105,68	125,32	148,62	176,24			
C , кН/м	400		800	1700	2500	0,9677	0,95<P<0,98	1,06<13,9
	$2\bar{A}_{T.E}$	140,55	143,32	138,67	133,33			
	$2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	141,32	141,95	139,57	133,04			
β , кН·с/м	0,1		40	70	90	0,91	0,9<P<0,95	1,45<13,9
	$2\bar{A}_{T.E}$	142,18	141,77	136,07	135,85			
	$2A_T = -0,08082 \cdot \beta + 143,0107$							
	$2\bar{A}_{T.f}$	143,0	139,78	137,35	135,74			

Таблиця 4.37 – Значення коефіцієнта B_i для дослідів 17-32 планованого експерименту

№експ.	17	18	19	20	21	22
B_i	$4,2200 \cdot 10^{-7}$	$3,3127 \cdot 10^{-7}$	$3,7334 \cdot 10^{-7}$	$3,5638 \cdot 10^{-7}$	$3,3146 \cdot 10^{-7}$	$4,1244 \cdot 10^{-7}$
№експ.	23	24	25	26	27	28
B_i	$3,5653 \cdot 10^{-7}$	$3,7444 \cdot 10^{-7}$	$3,9650 \cdot 10^{-7}$	$3,6595 \cdot 10^{-7}$	$4,2782 \cdot 10^{-7}$	$3,4857 \cdot 10^{-7}$
№експ.	13	14	15	16		
B_i	$3,4293 \cdot 10^{-7}$	$3,7338 \cdot 10^{-7}$	$3,3570 \cdot 10^{-7}$	$4,0774 \cdot 10^{-7}$		

У табл. 4.38 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(B_{CP}-\Delta; B_{CP}+\Delta)$. Значення Δ обчислюється за формулою (4.29) і за цим значенням межі інтервалу виділення артефактів: $3,31398 \cdot 10^{-7}$ - $4,3058 \cdot 10^{-7}$.

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,3232 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{17/16} = 0,583 \cdot 10^{-7} \quad (4.28)$$

Таблиця 4.38 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,7228 \cdot 10^{-7}$	$1,0446 \cdot 10^{-15}$	$0,3232 \cdot 10^{-7}$	1,75 $\alpha=0,1$	Відс.	-	-	-

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації за формулою (4.8) – $K_{BAP} = 8,7\%$. Це значення менше 10% тобто сукупність однорідна малої мінливості і середнє значення $3,7228 \cdot 10^{-7}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

Рівняння багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$\begin{aligned} 2A_T = B_{CP} \cdot f(n) \cdot f(F_{CT}) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = & 3,7228 \cdot 10^{-7} \cdot (n / (0,00689 \cdot n + 0,042)) \times \\ & \times (75,1486 \cdot e^{0,034096 F_{CT}}) \times (139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2) \times \\ & \times (-0,08082 \cdot \beta + 143,0107). \end{aligned} \quad (4.29)$$

В табл. 4.39 наведено значення $2A_{T.M}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і

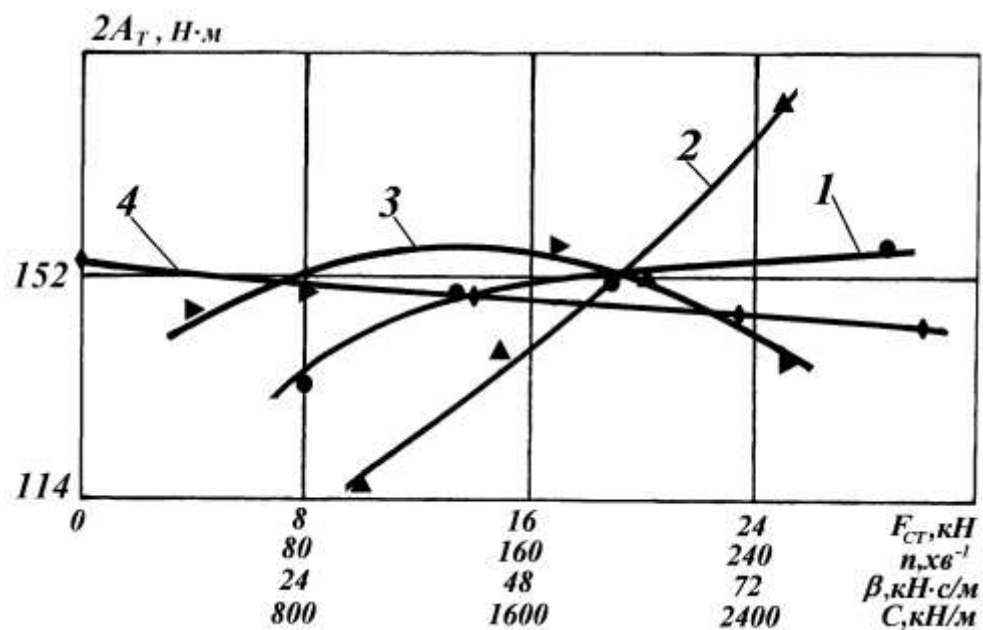
експериментальними значеннями планованого експерименту $2A_{T.E}$, обчислені за формулою 4.26.

Таблиця 4.39 – Експериментальні значення $2A_{T.E}$ і значення, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції, твердість породи 2050 МПа

№ досл.	Частота обертання n , хв ⁻¹	Осьове статичне навантаження на долото F_{CT} , кН	Жорсткість компоновки бурильного інструмента C , кН/м	Коефіцієнт демпфування компоновки β , кН·с/м	$2A_{T.E}$	$2A_{T.M}$	ВП%
1	82	10	400	0,1	121,76	107,41	11,8
2	82	15	2500	40	104,3	117,22	-12,4
3	82	20	800	70	146,15	145,76	0,3
4	82	25	1700	90	160,76	167,92	-4,45
5	133	10	800	90	93,67	105,19	-12,3
6	133	15	1700	70	137,51	124,13	9,7
7	133	20	400	40	145,26	151,70	-4,4
8	133	25	2500	0,1	174,6	173,56	0,6
9	188	10	1700	40	114,92	107,91	6,1
10	188	15	800	0,1	130,87	133,15	-1,7
11	188	20	2500	90	161,42	140,48	13,0
12	188	25	400	70	167,63	179,07	-6,8
13	285	10	2500	70	93	100,97	-8,6
14	285	15	400	90	127,55	127,19	0,3
15	285	20	1700	0,1	141,5	156,95	-10,9
16	285	25	800	40	202,61	185,03	8,7

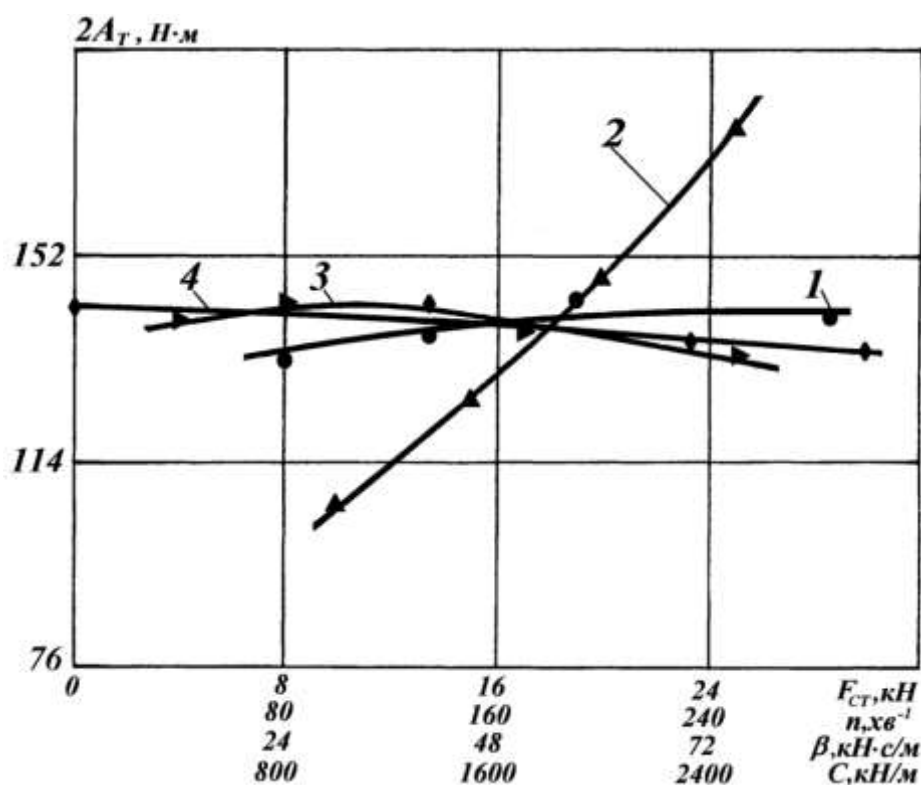
Середнє значення відносної похибки $ВП_{CP} = 7,0\%$.

На рис. 4.11 наведено графіки частинних емпіричних залежностей між подвійною амплітудою $2A_T$ і зовнішніми незалежними чинниками, побудованих за даними табл. 4.30, твердість породи 1440 МПа, а на рис. 4.12 наведено графіки таких же частинних емпіричних залежностей, побудованих за даними табл. 4.36, для породи твердістю 2050 МПа.



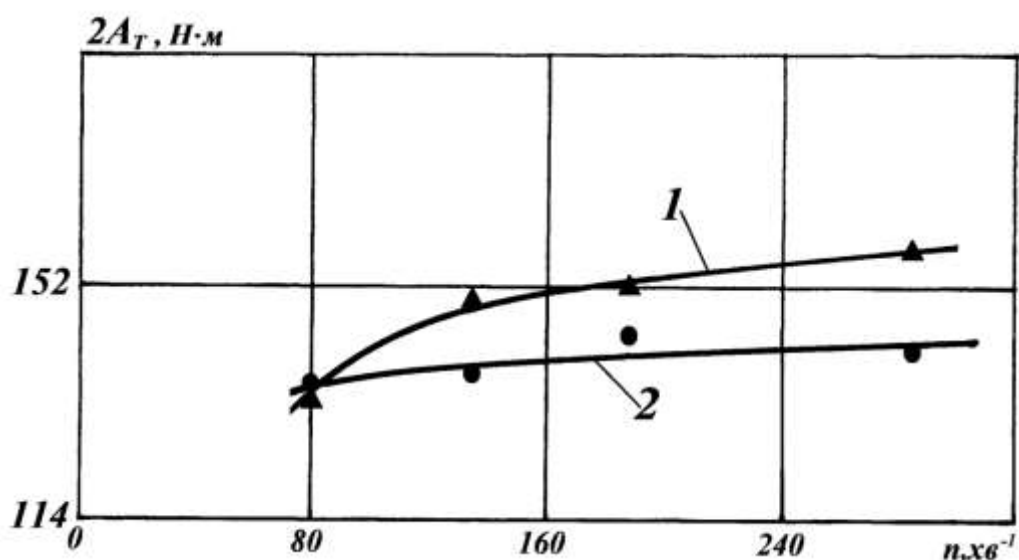
1(●) – $2A_T = f(n)$; 2(▲) – $2A_T = f(F_{CT})$; 3(►) – $2A_T = f(C)$; 4(◆) – $2A_T = f(\beta)$

Рисунок 4.11 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 1440 МПа



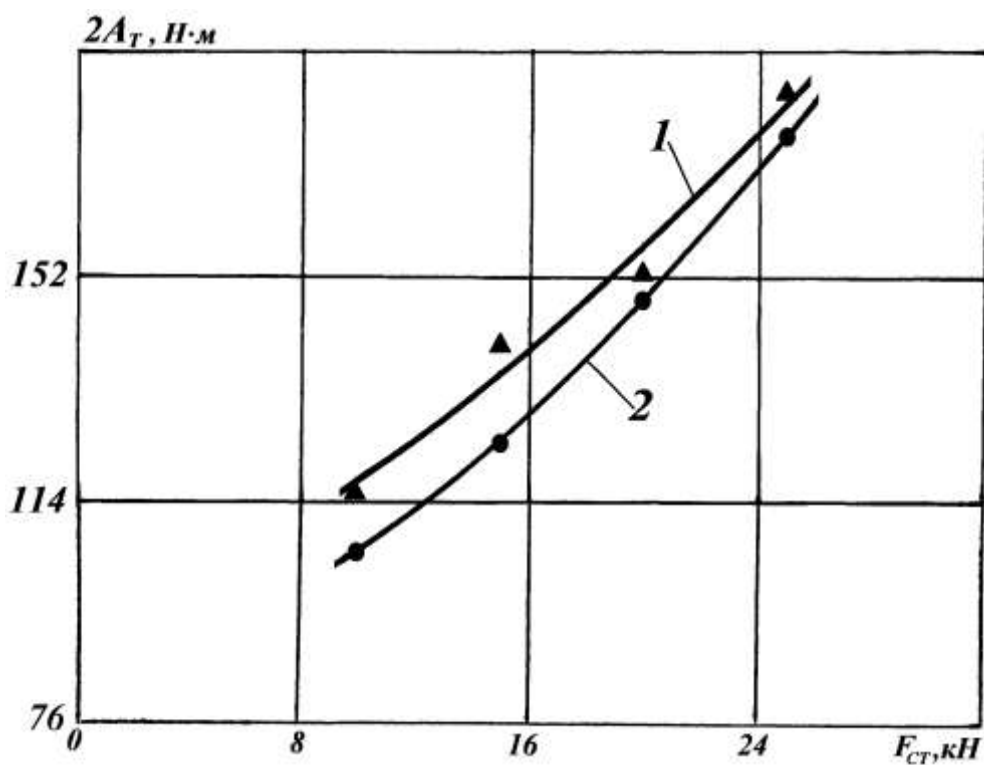
1(●) – $2A_T = f(n)$; 2(▲) – $2A_T = f(F_{CT})$; 3(►) – $2A_T = f(C)$; 4(◆) – $2A_T = f(\beta)$

Рисунок 4.12 – Графіки частинних залежностей одержані методом планованого експерименту, твердість породи 2050 МПа



1(►) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 4.13 – Графіки частинних залежностей $2A_T = f(n)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи



1(►) – $p_u = 1440 \text{ МПа}$; 2(●) – $p_u = 2050 \text{ МПа}$

Рисунок 4.14 – Графіки частинних залежностей $2A_T = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

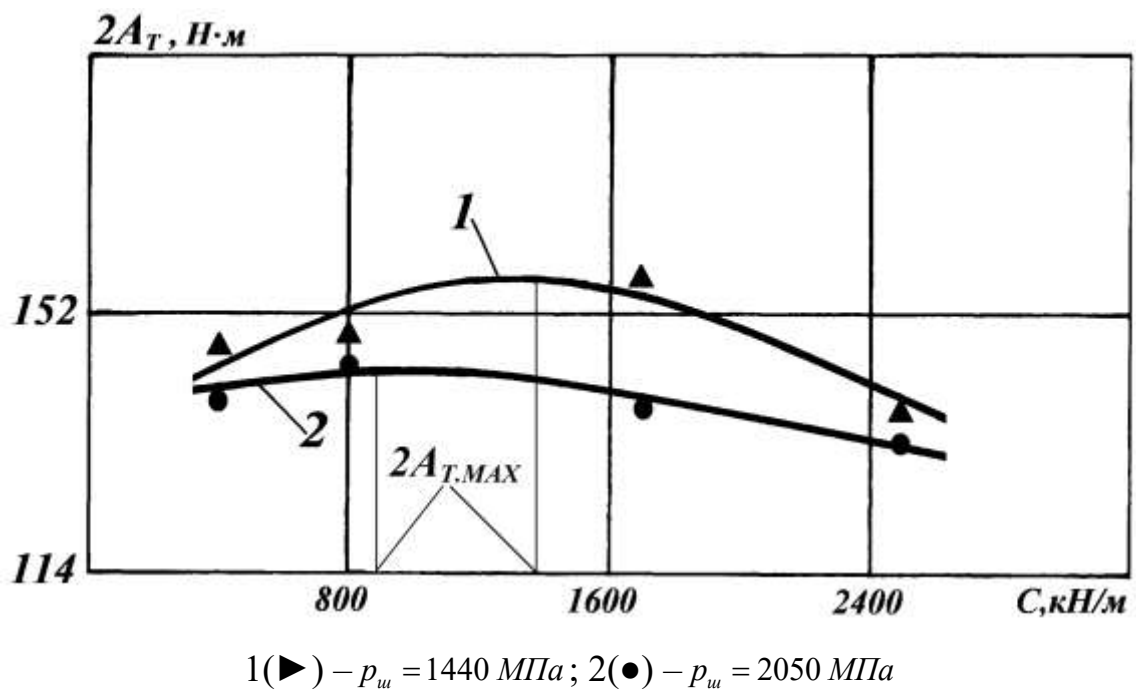


Рисунок 4.15 – Графіки частинних залежностей $2A_T = f(F_{CT})$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

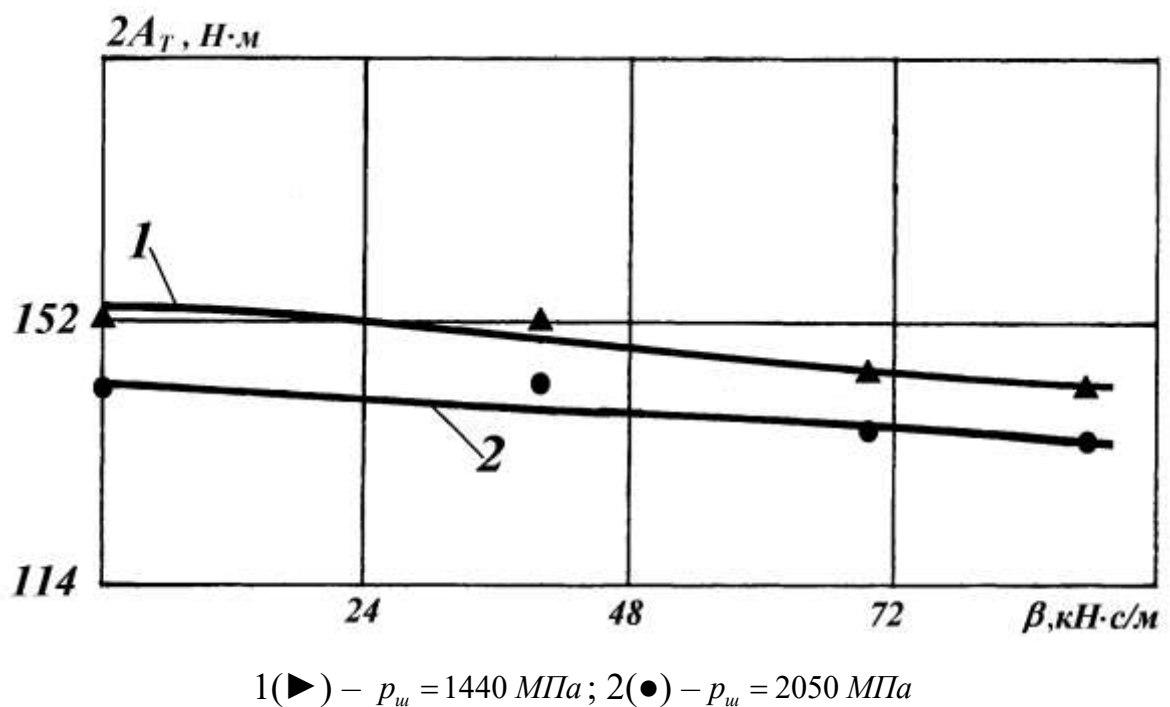


Рисунок 4.16 – Графіки частинних залежностей $2A_T = f(\beta)$ з наведеними на них експериментальними значеннями, одержані для різної за твердістю гірської породи

На рис. 4.13-4.16 наведено графіки частинних емпіричних залежностей $2A_T = f(n)$, $2A_T = f(F_{CT})$, $2A_T = f(C)$ і $2A_T = f(\beta)$ для породи твердістю 1440 і 2050 МПа, побудовані за рівняннями регресії, які наведено в таблицях 4.30 і 4.36.

Частинні емпіричні залежності $2A_{T.f} = f(n)$, рис. 4.13, незалежно від твердості породи, монотонно зростаючі, при зміні частоти обертання долота в інтервалі 82-285 хв^{-1} величина $2A_{T.f}$, зростає зі значення 134,98 Н·м до значення 157,36 Н·м, при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, і від 135,1 Н·м до 142,1 Н·м, при бурінні в породі твердістю 2050 МПа. Вплив частоти обертання на збільшення подвійної амплітуди повинен бути підтверджений нерівністю $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$, $i=1...4$. Для породи твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.41, цей вплив підтверджений 90% довірчими інтервалами для всіх рівнів частоти обертання: $136,43 < 145,18$; $148,88 < 152,05$ і $153,32 < 157,35$.

Для породи твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.42, за довірчими 90% довірчими інтервалами для всіх рівнів частоти обертання одержимо: $136,68 < 137,92$; $139,64 > 137,97$, $143,19 > 141,31$ і $139,64 < 141,31$. За цим значення $2A_{T.E}$, за експериментальними даними для рівня $n=188 \text{ хв}^{-1}$, одержане з похибкою, яка більша за 90% довірчий інтервал. Для рівнів 133 і 285 хв^{-1} за довірчими інтервалами з ймовірністю 0,9 вплив частоти обертання на величину $2A_{T.f}$ підтверджується.

За нерівністю $2A_{T.f.MIN.1440.i} > 2A_{T.f.MAX.2050i}$ $i=1...4$ вплив твердості гірської породи, за 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл.Е.41 і Е.42, підтверджений тільки для рівнів 133, 188 і 285 хв^{-1} : $145,18 > 139,64$; $152,06 > 143,19$ і $157,37 > 142,88$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи величина $2A_{T.f}$ на долоті зменшується.

Частинні емпіричні залежності $2A_{T.f} = f(F)$, рис.4.14, незалежно від твердості породи, монотонно зростаючі. Вплив осьового навантаження на збільшення подвійної амплітуди підтверджений нерівністю $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$, $i=1...4$. Для породи твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл.Е.43, за 90% довірчими

інтервалами для всіх рівнів осьового навантаження: $118,73 < 131,16$; $139,8 < 153,24$ і $160,72 < 180,65$, для породи твердістю 2050 МПа, додаток Е, табл. Е.44: $105,81 < 125,1$; $125,53 < 148,59$ і $148,65 < 176,02$.

За нерівністю $2A_{T.f.MIN.1440.i} > 2A_{T.f.MAX.2050i} \quad i = 1 \dots 4$ вплив твердості гірської породи, за 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.43 і Е.44, підтверджений для всіх рівнів навантаження: $115,85 > 105,81$; $131,16 > 125,153$, $153,24 > 148,65$ і $180,57 > 178,36$, тобто з ймовірністю 0,9 можна стверджувати що із збільшенням твердості породи величина $2A_{T.f}$ на долоті зменшується.

Емпіричні залежності $2A_{T.f} = f(C)$, рис. 4.15, незалежно від твердості породи, представлені поліномами другої степені. Для породи твердістю 1440 МПа інтервал 400-2500 кН/м можна розділити на дві ділянки, одна в інтервалі 400-1371 кН/м, друга в інтервалі 1371-2500 кН/м. В першому інтервалі спостерігається зростання значення $2A_{T.f}$ з величини 144,35 до величини 157. В другому інтервалі спостерігається зменшення подвійної амплітуди зміни крутного моменту на долоті від 157 до 140,05. Для першої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 400, 800 і 1371 кН/м, додаток Е, табл. Е.45, зростання величини $2A_{T.f}$ – це наслідок впливу жорсткості компонування бурильного інструменту.

Для другої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 1371, 1700 і 2500 кН/м, додаток Е, табл. Е.45, в діапазоні жорсткості 1371-1700 кН/м, вплив жорсткості на зміну величини $2A_{T.f}$ не встановлений. Цей вплив зафіксований тільки при зміні жорсткості з 1371 кН/м до 2500 кН/м, $154,56 > 140,77$.

Для породи твердістю 2050 МПа За залежністю $2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$ інтервал 400-2500 кН/м можна розділити на дві ділянки, одна в інтервалі 400-842 кН/м, при цьому значенні жорсткості зафіксований локальний максимум величиною 142 Н·м, друга в інтервалі

842-2500 кН/м. В першому інтервалі спостерігається зростання значення $2A_{T.f}$ з величини 141,32 до величини 142. За 80% довірчими інтервалами $2A_{T.f}$ на рівнях 400, 800 і 842 кН/м, додаток Е, табл. Е.46, вплив жорсткості на зміну амплітуди не виявлений, і різниця між значеннями 141,32 до величини 142 пояснюється випадковою похибкою при проведенні експериментальних досліджень. Для другої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 842, 1700 і 2500 кН/м, додаток Е, табл. Е.46, зменшення величини $2A_{T.f}$ – це наслідок впливу жорсткості компонування бурильного інструменту.

Із збільшенням твердості породи подвійна амплітуда, додаток Е, табл. Е.45 і Е.46, за 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ зменшується для всіх рівнів жорсткості (400→142,96>141,97; 800→149,65>143,1; 1700→153,53>140,33; 2500→139,33>133,28).

Частинні емпіричні залежності $2A_{T.f} = f(\beta)$, рис.4.16, незалежно від твердості породи, монотонно спадаючі, при зміні коефіцієнта демпфування в інтервалі 0-90 кН·с/м величина $2A_{T.f}$, зменшується зі значення 153,78 Н·м до значення 143,25 Н·м, при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, і від 143 Н·м до 135,74 Н·м, при бурінні в породі твердістю 2050 МПа.

За нерівністю $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 0.1, 40, 70 і 90 кН/м, при бурінні в породі твердістю 1440 МПа, додаток Е, табл. Е.47, зменшення величини $2A_{T.f}$ – це наслідок впливу коефіцієнту демпфування компонування бурильного інструменту, 152,72>151,36; 146,84>146,54 і 144,63>143,94.

Для породи 2050 МПа, оцінюючи вплив β на величину $2A_{T.f}$, з ймовірністю 0.9, додаток Е, табл. Е.48, можна стверджувати що зменшення $2A_{T.f}$ – це наслідок збільшення коефіцієнту демпфування компонування бурильного інструменту в інтервалі 0-90 кН·с/м.

Із збільшенням твердості породи подвійна амплітуда, додаток Е, табл. Е.47 і Е.48, за 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ зменшується для всіх рівнів жорсткості $(0,1 \rightarrow 152,72 > 143,69; \quad 40 \rightarrow 146,84 > 141,45; \quad 70 \rightarrow 144,63 > 138,3; \quad 90 \rightarrow 142,56 > 135,83)$.

Висновки до розділу 4

1. Вперше, з метою більш детального аналізу результатів досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті та можливістю оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті безпосередньо в процесі буріння, запропоновано нові показники процесу інтенсивності руйнування гірської породи. До цих показників відносимо інтегральний коефіцієнт оцінки динамічності зміни процесу моменту і величину подвійної амплітуди $2A_T$ коливного процесу зміни крутного моменту на долоті.

2. За результатами досліджень, проведених на основі планованого факторного експерименту, з'ясовано, що характер зміни емпіричних залежностей $K_{дин.ін.f} = f(F_{СТ})$, $k_{T.д.мах.f} = f(F_{СТ})$, і $2A_{T.f} = f(F_{СТ})$ ідентичний, за яким із збільшенням навантаження енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зростає.

Величина $K_{дин.ін.f}$, в діапазоні навантаження 10-25 кН, зростає для породи твердістю 1440 МПа на 13,5%, для породи твердістю 2050 МПа – на 36,1%. Вплив навантаження підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $K_{дин.ін.f}$, обчислених тільки в інтервалах $F_{СТ}$: 10-15, 10-20 і 10-25 кН, в інтервалах 15-20 і 20-25 кН різниця між значеннями $K_{дин.ін.f}$, пояснюється випадковою похибкою. При бурінні в породі 2050 МПа, з ймовірністю 0.9, вплив навантаження на $K_{дин.ін.f}$ зафіксований на всіх рівнях навантаження на кожному рівні $F_{СТ}$. Величина $k_{T.д.мах.f}$, в діапазоні навантажень 10-25 кН, зростає для породи твердістю 1440 МПа на 8,5%, для породи твердістю 2050 МПа – на 5,4%. Для породи твердістю 1440 МПа вплив навантаження при переході з одного рівня на інший підтверджується 90% довірчими

інтервалами для значень $k_{T.\partial.\max.f}$, обчисленими на кожному рівні F_{OC} . Для породи твердістю 2050 МПа збільшення $k_{T.\partial.\max.f}$ підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $k_{T.\partial.\max.f}$, обчисленими в інтервалі 10-20 кН. В інтервалі 20-25 кН зміна $k_{T.\partial.\max.f}$ пояснюється випадковою похибкою.

Величина $2A_{T.f.i}$, в діапазоні навантажень 10-25 кН, зростає для породи твердістю 1440 МПа на 54,8%, для породи твердістю 2050 МПа – на 66,8%. Вплив навантаження при переході з одного рівня на інший підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $2A_{T.f.i}$, обчисленими на кожному рівні F_{OC} .

3. Вплив частоти обертання на величини $K_{\text{дин.ін.}f}$, $k_{T.\partial.\max.f}$ і $2A_{T.f}$ ідентичний впливу осьового навантаження, тобто із збільшенням частоти енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зростає. Величина $K_{\text{дин.ін.}f}$, в діапазоні частот 82-285 хв⁻¹, зростає для породи твердістю 1440 МПа на 5,5%, для породи твердістю 2050 МПа – на 20,2%.

Для породи твердістю 1440 МПа, за 80% довірчими інтервалами для значень $K_{\text{дин.ін.}f}$, вплив частоти обертання зафіксований в інтервалах зміни 82-188 хв⁻¹ і 188-285 хв⁻¹, в інтервалах 82-133 хв⁻¹ і 133-188 хв⁻¹ зміна частоти не впливає на величину $K_{\text{дин.ін.}f}$.

Для породи твердістю 2050 МПа вплив частоти при переході з одного рівня на інший підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $K_{\text{дин.ін.}f}$, обчисленими на кожному рівні n .

Для породи твердістю 1440 МПа величина $k_{T.\partial.\max.f}$ зростає в аналізованому діапазоні частоти обертання на 52,2%, для породи 2050 МПа – на 21,4%. Вплив частоти при переході з одного рівня на інший підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $k_{T.\partial.\max.f}$ обчисленими на кожному рівні n .

Величина $2A_{T.f.i}$, в діапазоні частоти обертання 82-285 хв⁻¹, зростає для породи твердістю 1440 МПа на 16,6%, для породи твердістю 2050 МПа – на 5,2%. Для породи твердістю 1440 МПа вплив частоти при переході з одного рівня на інший

підтверджується 80% довірчими інтервалами для значень $2A_{T.f.i}$, обчисленими на кожному рівні n . Для породи твердістю 2050 МПа вплив частоти обертання зафіксований в інтервалах зміни 82-133 хв⁻¹ і 133-285 хв⁻¹, в інтервалах 133-188 хв⁻¹ і 188-285 хв⁻¹ зміна частоти не впливає на величину $2A_{T.f.i}$.

4. За результатами досліджень, проведених на основі планованого факторного експерименту, з'ясовано, що характер зміни емпіричних залежностей $K_{дин.лн.f} = f(\beta)$, $k_{T.д.мах.f} = f(\beta)$ і $2A_{T.f} = f(\beta)$ ідентичний, тобто із збільшенням коефіцієнта демпфування бурильного інструменту енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зменшується.

Величина $K_{дин.лн.f}$, в діапазоні 0-90 кН·с/м, зменшується для породи твердістю 1440 МПа на 24,9%, для породи твердістю 2050 МПа – на 6,9%.

Для породи твердістю 1440 МПа вплив коефіцієнту демпфування при переході з одного рівня на інший підтверджується 90% довірчими інтервалами для значень $K_{дин.лн.f}$, обчислених на кожному рівні β . Для породи твердістю 2050 МПа вплив β зафіксований тільки в інтервалі зміни 0-40 кН·с/м, в інтервалі 40-90 кН·с/м зміна коефіцієнта демпфування не впливає на величину $K_{дин.лн.f}$.

Для породи твердістю 1440 МПа величина $k_{T.д.мах.f}$, в аналізованому діапазоні β , зменшується на 1,45%, для породи 2050 МПа – на 4,3%. Для породи твердістю 1440 МПа вплив β зафіксований тільки в інтервалі зміни 0-70 кН·с/м, в інтервалі 70-90 кН·с/м зміна коефіцієнта демпфування не впливає на величину $k_{T.д.мах.f}$. Для породи твердістю 2050 МПа вплив коефіцієнта демпфування при переході з одного рівня на інший підтверджується 80% довірчими інтервалами для значень $k_{T.д.мах.f}$, обчислених на кожному рівні β .

Величина $2A_{T.f.i}$, в діапазоні 0-90 кН·с/м, зменшується для породи твердістю 1440 МПа на 7,4%, для породи твердістю 2050 МПа – на 5,4%. Незалежно від твердості породи вплив коефіцієнта демпфування при переході з одного рівня на інший підтверджується 80% довірчими інтервалами для значень $2A_{T.f.i}$, обчислених на кожному рівні β .

5. Емпіричні залежності $K_{\text{дин.ін.}f} = f(C)$, $k_{T.\partial.\text{max.}f} = f(C)$, і $2A_{T.f} = f(C)$ представлені поліномами другого і третього ступенів, які характеризуються наявністю локального максимуму, і для яких експериментальні дані поділяються на дві ділянки: перша – це зростання значень відповідного показника оцінки динамічності до локального максимуму, друга – це зменшення цих значень до мінімального значення показника.

Величина $K_{\text{дин.ін.}f}$, в діапазоні жорсткостей 400-1419 кН/м при значенні $C=1419$ кН/м має локальний максимум і зростає для породи твердістю 1440 МПа на 28,1%.

При бурінні в породі твердістю 2050 МПа зафіксований локальний максимум $K_{\text{дин.ін.}f.\text{max}} = 0,1056$, при $C = 1424 \text{ кН / м}$, за цим для першої ділянки виділяємо три рівні жорсткості: 400, 800 і 1424 кН/м, а для другої – 1424, 1700 і 2500 кН/м.

Величина значення $K_{\text{дин.ін.}f}$, в інтервалі 400-1424 кН/м, із збільшенням жорсткості зростає, а в інтервалі 1424-2500 кН/м зменшується із збільшенням жорсткості.

Аналогічно залежностям $K_{\text{дин.ін}} = f(C)$, рис. 4.5, особливістю залежностей $k_{T.\partial.\text{max.}f} = f(C)$ є наявність локального максимуму, який розділяє графік залежності на дві криволінійні ділянки. При бурінні в породі твердістю 1440 МПа перша монотонно зростаюча ділянка – це частина графіка від значення $k_{T.\partial.\text{max.}f} = 2,4071$ визначеного для першого рівня жорсткості – $C=400$ кН/м, до значення локального максимуму, $k_{T.\partial.\text{max.}f.\text{max}} = 2,5814$, при $C = 841 \text{ кН / м}$, друга монотонно спадаюча ділянка – від значення локального максимуму до значення $k_{T.\partial.\text{max.}f} = 1,9015$, визначеного для четвертого рівня жорсткості – $C=2500$ кН/м. За цим для першої ділянки виділяємо два рівні жорсткості: 400 і 841 кН/м, для другої – три рівні: 841, 1700 і 2500 кН/м. За 90% довірчими інтервалами для значень $k_{T.\partial.\text{max.}f}$: 2,4071 і 2,5814, додаток Е, табл. Е.38, нерівність впливу жорсткості на величину $k_{T.\partial.\text{max.}f}$ не підтверджена, $k_{T.\partial.\text{max.}f.\text{max.}400} < k_{T.\partial.\text{max.}f.\text{min.}841} - 2,4569 > 2,3595$.

Для другої ділянки, за 90% довірчими інтервалами, додаток Е, табл. Е.38, нерівність $k_{T.\partial.max.f.min.i} > k_{T.\partial.max.f.max.i+1}$, підтверджена для всіх рівнів жорсткості: одержані нерівності $2,3595 > 2,3586$ і $2,2414 > 1,9202$. За наведеним вище матеріалом вплив жорсткості на процес зміни $k_{T.\partial.max.f}$ підтверджений тільки для другої ділянки.

Емпірична частинна залежність $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ для породи твердості 2050 МПа, апроксимована поліномом третього степеня, $k_{T.\partial.max} = 1,2373168 + 0,0034588 \cdot C - 2,72196 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 5,94907 \cdot 10^{-10} \cdot C^3$, за яким точкове значення 2,5814 локального максимуму, одержане для жорсткості 925к Н/м. За цими рівнянням основна похибка практично відсутня, і становить $\sigma_0 = 1,1 \cdot 10^{-14}$. Значення експериментальних даних і значення, обчислені за поліномом третього ступеня, практично співпадають, тобто між цими значеннями випадкова похибка відсутня. Для першої ділянки, $C=400-925$ кН/м, цієї залежності із збільшенням жорсткості значення $k_{T.\partial.max.f}$ зростають (2,2234-2,5814), для другої ділянки, $C=925-2500$ кН/м, зменшуються.

Емпіричні залежності $2A_{T.f} = f(C)$, рис. 4.15, незалежно від твердості породи, представлені поліномами другої степені. Для породи твердістю 1440 МПа інтервал 400-2500 кН/м можна розділити на дві ділянки, одна в інтервалі 400-1371 кН/м, друга в інтервалі 1371-2500 кН/м. В першому інтервалі спостерігається зростання значення $2A_{T.f}$ з величини 144,35 до величини 157. В другому інтервалі спостерігається зменшення подвійної амплітуди зміни крутного моменту на долоті від 157 до 140,05. Для першої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MAX.i} < 2A_{T.f.MIN.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 400, 800 і 1371 кН/м, додаток Е, табл. Е.45, зростання величини $2A_{T.f}$ – це наслідок впливу жорсткості компонування бурильного інструменту.

Для другої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 1371, 1700 і 2500 кН/м, додаток Е, табл. Е.45, в

діапазоні жорсткості 1371-1700 кН/м, вплив жорсткості на зміну величини $2A_{T.f}$ не встановлений. Цей вплив зафіксований тільки при зміні жорсткості з 1371 кН/м до 2500 кН/м, $154,56 > 140,77$.

Для породи твердістю 2050 МПа за залежністю $2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$ інтервал 400-2500 кН/м можна розділити на дві ділянки, одна в інтервалі 400-842 кН/м, при цьому значенні жорсткості зафіксований локальний максимум величиною 142 Н·м, друга в інтервалі 842-2500 кН/м. В першому інтервалі спостерігається зростання значення $2A_{T.f}$ з величини 141,32 до величини 142. За 80% довірчими інтервалами $2A_{T.f}$ на рівнях 400, 800 і 842 кН/м, додаток Е, табл. Е.46, вплив жорсткості на зміну амплітуди не виявлений, і різниця між значеннями 141,32 до величини 142 пояснюється випадковою похибкою при проведенні експериментальних досліджень. Для другої ділянки за нерівністю $2A_{T.f.MIN.i} > 2A_{T.f.MAX.i+1}$ і 90% довірчими інтервалами значень $2A_{T.f}$ на рівнях 842, 1700 і 2500 кН/м, додаток Е, табл. Е.46, зменшення величини $2A_{T.f}$ – це наслідок впливу жорсткості компонування бурильного інструменту.

За наведеним вище матеріалом кращим показником оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті при зміні жорсткості компонування бурильного інструменту є коефіцієнт $K_{дин.ін.}$.

Вперше встановлено, характер зміни емпіричних залежностей $K_{дин.ін.f} = f(C)$, $E_T = f(C)$ і $E_{зк} = f(C)$ ідентичний, який характеризується появою локального максимуму в однаковому інтервалі фіксованих значень рівнів жорсткості компонування бурильного інструменту. В цьому ж інтервалі знаходиться і мінімум енергоемності процесу руйнування породи [1], тобто за залежністю $K_{дин.ін.f} = f(C)$ можна попередньо визначити жорсткість компонування низу бурильної колони, за якою досягається мінімум енергетичних затрат на процес буріння, і при необхідності перевірити правильність вибраної жорсткості аналізом внутрішньої структури процесу зміни крутного моменту.

РОЗДІЛ 5

РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ЗМІНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ЗАКІНЧЕНИХ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН І РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ КОМПОНУВАННЯ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

5.1 Встановлення залежностей між параметрами режиму буріння та механічною швидкістю буріння і крутним моментом на долоті за даними пробурених свердловин

В розділі 2.3 запропоновано методику аналізу процесу зміни технологічних параметрів процесу буріння глибоких нафтових і газових свердловин, будівництво яких завершено. За цією методикою було проаналізовано процес зміни технологічних параметрів буріння, а саме: осьового статичного навантаження на долото, частоти обертання долота, крутного моменту ротора верхнього приводу і механічної швидкості буріння, в двох інтервалах поглиблення свердловини Ужгородська 104. В інтервалі 33-253 м буріння велось при відсутності геологічних досліджень, в інтервалі 450-600 м одночасно з бурінням вівся геологічний журнал з результатами аналізу відібраного шламу. Параметри бурового розчину не змінні.

В табл. 5.1, 5.2 наведено результати аналізу процесу зміни технологічних параметрів в інтервалі 33-253 м закінченої свердловини Ужгородська 104.

В табл. 5.1 ЛД – аббревіатура лінійної ділянки; $\bar{V}_{MEH}$ – середнє значення вибірок механічної швидкості; D_V – дисперсія вибірок механічної швидкості; σ_V – середнє квадратичне відхилення вибірок механічної швидкості; R_V – коефіцієнт варіації дискретних значень вибірок механічної швидкості; $\bar{n}_d$ – середнє значення частоти обертання вибірок їх значень; D_n – дисперсія вибірок частоти обертання; σ_n – середнє квадратичне відхилення вибірок частоти обертання; R_n – коефіцієнт варіації дискретних значень вибірок частоти обертання.

Таблиця 5.1 – Інтервали лінійних ділянок (ЛД) в діапазоні заглиблення 33-253 м і статистичні характеристики вибірок механічної швидкості та частоти обертання долота виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення

вибірок $\bar{V}_{MEX}$

Позначення та інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$D_V,$ (м / год) ²	$\sigma_V,$ м / год	$R_V,$ %	$\bar{n}_d,$ хв ⁻¹	$D_n,$ (хв ⁻¹) ²	$\sigma_n,$ хв ⁻¹	$R_n,$ %
ЛД.10 213-220	9,52	10,203	3,1942	33,5	45,19	0,1097	0,3312	0,7
ЛД.2 47-54	11,10	21,6617	4,6542	41,9	29,33	0,0847	0,2911	0,99
ЛД.5 85-107	11,95	15,2726	3,908	32,7	40,34	13,0177	3,608	8,9
ЛД.8 153-183	14,5	35,7329	5,9777	41,2	46,93	3,7608	1,9393	4,1
ЛД.11 223-253	14,97	83,2018	9,1215	60,9	45,57	13,8944	3,7275	8,2
ЛД.9 183-213	15,48	45,8627	6,7722	43,7	45,75	13,7663	3,7103	8,1
ЛД.3 118-122	16,52	20,2932	4,5048	27,3	32,03	0,2168	0,4656	1,45
ЛД.6 58-62	16,52	20,2932	4,5048	27,3	44,35	3,9797	1,9949	4,5
ЛД.7 123-153	17,05	29,0029	5,0993	29,9	43,68	2,1486	1,4658	3,4
ЛД.4 63-85	19,20	27,04	5,20	27,1	40,55	7,1734	2,6783	6,6
ЛД.1 37-43	31,84*	99,1936	9,9596	31,3	44,68	2,4749	1,5732	3,5

За табл. 5.1 мінливість дискретних значень вибірок механічної швидкості для 7-ми лінійних ділянок значна, коефіцієнт варіації більший 30% і це означає, що середнє значення цих вибірок не є типовою характеристикою вибірок, що свідчить про нестационарність (нестабільність) процесу зміни механічної швидкості.

Для вибірок дискретних значень частоти обертання ротора спостерігається незначна (мала) мінливість, коефіцієнт варіації менший за 10%, що вказує на стабільність частоти обертання в процесі буріння [69].

Таблиця 5.2 – Інтервали лінійних ділянок в діапазоні заглиблення 33-253 м і статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото і крутного моменту на долоті виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення вибірок $\bar{V}_{MEX}$

Позначення та інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$\bar{F}_{ДОЛ}, мс$	$\sigma_F,$ мс	$R_F,$ %	$\bar{n}_d,$ хв ⁻¹	$\bar{T}_P,$ кН · м	$T_{P.МИН}$ $T_{P.МАХ},$ кН · м	σ_T	$R_T,$ %
ЛД.10 213-220	9,52	1,6486	0,2166	13,1	45,19	4,6	2,78-7,19	1,5792	34,3
ЛД.2 47-54	11,10	1,1457	0,0774	6,8	29,33	1,72	0,92-3,79	1,4366	83,5
ЛД.5 85-107	11,95	1,295	0,3252	2,51	40,34	3,58	2,98-4,18	0,3712	10,4
ЛД.8 153-183	14,5	1,486	0,4252	28,6	46,93	5,74	2,62-7,43	1,5473	26,5
ЛД.11 223-253	14,97	1,6783	0,3014	18,0	45,57	5,43	2,71-7,26	1,5938	29,4
ЛД.9 183-213	15,48	1,8867	0,4132	21,9	45,75	5,52	3,13-7,15	1,3086	23,7
ЛД.3 58-62	16,52	1,4325	0,2919	20,4	32,03	1,52	1,43-1,6	0,0723	4,8
ЛД.6 118-122	16,52	1,485	0,1706	11,5	44,35	4,95	4,86-5,03	0,0737	1,5
ЛД.7 123-153	17,05	1,5137	0,487	32,2	43,69	5,94	4,03-7,364	0,8197	13,7
ЛД.4 63-85	19,20	1,7182	0,4558	26,5	40,55	2,3	1,72-2,86	0,3506	15,2
ЛД.1 37-43	31,84*	0,9283	0,2976	32,1	44,68	6,08	3,69-7,32	1,3291	21,9

В табл. 5.2 ЛД – аббревіатура лінійної ділянки; $\bar{F}_{ДОЛ}$ – середнє значення вибірок значень осьового навантаження на долото; D_F – дисперсія вибірок осьового навантаження на долото; σ_F – середнє квадратичне відхилення вибірок осьового навантаження на долото; R_F – коефіцієнт варіації дискретних значень вибірок осьового навантаження на долото; $\bar{T}_P$ – середнє значення вибірок значень крутного моменту ротора; σ_T – середнє квадратичне відхилення вибірок крутного моменту ротора; R_T – коефіцієнт варіації дискретних значень вибірок крутного моменту ротора.

За табл. 5.2 мінливість дискретних значень вибірок осьового навантаження на долото тільки для двох із одинадцяти лінійних ділянок значна ($R_T > 30\%$) і це означає, що середнє значення цих вибірок не є типовою характеристикою вибірок, для інших вибірок сукупність значень однорідна, що свідчить про стаціонарність (стабільність) процесу зміни осьового навантаження на долото. Аналогічний висновок можна зробити і для мінливості значень крутного моменту на долоті [67].

За результатами тривалих досліджень впливу параметрів буріння на механічну швидкість встановлений однозначний результат – із збільшенням параметрів буріння, (осьового навантаження на долото і його частоти обертання) механічна швидкість зростає.

Для підтвердження або відхилення цього висновку за табл. 5.1 і 5.2 встановимо емпіричні залежності $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$.

В табл. 5.3 наведено 4-и пари значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання частоти обертання для підбору емпіричної залежності. Така кількість пар також відповідає умовам проведення планованого багатofакторного експерименту (див. підрозділ 2.2).

Таблиця 5.3 – Експериментальні пари значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 33-253 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$

$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	29,33	40,34	45,57	45,75
$\bar{V}_{MEX}, \text{м / год}$	11,10	11,95	14,97	15,48

В табл. 5.4 наведено 5-ть пар значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$ в порядку зростання величини осьового навантаження на долото.

Таблиця 5.4 – Експериментальні пари значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$ в інтервалі заглиблення 33-253 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$

$\bar{F}_{ДОЛ}, \text{мс}$	1,1457	1,295	1,486	1,5137	1,7182
$\bar{V}_{MEX}, \text{м / год}$	11,1	11,95	14,5	17,05	19,2

Результати підбору цих емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{V}_{MEX}$
$\bar{V}_{MEX}$, <i>м / год</i>	29,33	40,34	45,57	45,75		0,9651 0,95<P<0,98	1,18<1,34
	11,10	11,95	14,5	17,05			
	$\bar{V}_{MEX} = -360,01304 / \bar{n}_d + 22,59812$						
	1,1457	1,295	1,486	1,5137	1,7182	0,9696 0,99<P<0,998	0,85<1,48
	11,1	11,95	14,5	17,05	19,2		
	$\bar{V}_{MEX} = 3,341747 \cdot e^{1,0226 \cdot \bar{F}_{Дол}}$						

У табл. 5.5 позначено: $P=1-\alpha$ – ймовірність існування кореляційної залежності між змінними факторами та величиною $\bar{V}_{MEX}$, σ_0 – величина основної похибки у випадку заміни експериментальних даних відповідними емпіричними залежностями, визначеними за програмою App.1 (розділ 2.1).

За наведеним вище матеріалом задовільні умови апроксимації виконуються, ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{V}_{MEX}$ та параметрами режиму буріння більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{V}_{MEX}$ підтверджена.

За табл. 5.5 можна стверджувати що закономірності зміни залежностей $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ підтверджують висновок, за яким із збільшенням величини параметрів режиму буріння механічна швидкість зростає, тобто використання запропонованої методики аналізу промислових даних задовільне.

В табл. 5.7 наведено шість пар значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання частоти обертання.

Таблиця 5.6 – Інтервали лінійних ділянок в діапазоні заглиблення 450-600 м і статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото і крутного моменту на долоті виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення вибірок $\bar{V}_{MEX}$

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$\bar{F}_{ДОЛ},$ тс	$\sigma_F,$ тс	$R_F,$ %	$\bar{n}_d,$ $хв^{-1}$	$\bar{T}_P,$ кН · м	$T_{P.МІН}$ $T_{P.МАХ},$ кН · м	σ_T	$R_T,$ %
3ГІ 475-480	9,38	1,806	0,426	23,6	48,29	4,45	2,1-7,25	1,8825	42,3
7ГІ.1 510-514	10,23	1,83	0,2033	11,1	51,72	5,18	2,68-7,0	2,1367	41,2
8ГІ 520-525	11,28	2,026	0,2502	12,3	52,83	5,78	4,23-7,0	1,2061	20,9
2ГІ.2 465-470	12,35	1,606	0,1837	11,4	47,95	3,7	1,49-6,64	2,2506	60,8
6ГІ 501-510	12,89	2,0511	0,2789	13,6	52,51	4,58	2,77-7,89	1,6869	36,8
5ГІ 490-500	13,97	2,003	0,2538	17,8	50,328	5,12	1,4-7,26	2,2147	43,2
4ГІ 480-490	14,05	2,099	0,3591	17,1	45,768	6,21	3,74-7,34	1,2275	19,8
12ГІ 560-566	14,21	1,55	0,3813	24,6	65,4083	5,94	4,07-7,32	1,5612	26,3
7ГІ.2 514-520	15,82	1,9833	0,2077	10,5	51,8867	4,45	3,53-6,02	0,9155	20,6
10ГІ 541-550	16,01	2,009	0,3591	17,1	61,2122	5,47	3,14-7,3	1,7522	32,0
13ГІ 570-580	17,16	1,205	0,319	26,5	60,719	5,67	3,16-7,31	1,7609	31,0
9ГІ 536-540	19,88	1,4025	0,2361	16,8	53,305	6,14	4,58-7,25	1,3246	21,6
14ГІ 580-590	20,03	1,352	0,556	41,1	62,571	6,55	4,94-7,31	0,8844	13,5
15ГІ 590-600	21,18	1,115	0,4001	35,9	56,587	5,83	2,76-7,3	1,7064	29,3
11ГІ 550-555	21,78	1,1	0,1997	18,2	60,746	5,49	4,51-6,13	0,618	11,2
2ГІ.1 461-465	30,50	0,93	0,3426	36,8	43,92	4,86	2,8-6,73	1,6109	33,1

Примітка: ГІ – аббревіатура інтервалу геологічних досліджень

Таблиця 5.7 – Експериментальні пари значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$

$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	47,95	50,33	51,89	53,30	56,59	60,75
$\bar{V}_{MEX}, \text{м / год}$	12,35	13,97	15,82	19,88	21,18	21,78

В табл. 5.8 наведено п'ять пар значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$ в порядку зростання величини осьового навантаження на долото.

Таблиця 5.8 – Експериментальні пари значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$ в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$

$\bar{F}_{ДОЛ}, \text{мс}$	1,806	1,83	2,026	2,051	2,099
$\bar{V}_{MEX}, \text{м / год}$	9,38	10,23	11,28	12,89	14,05

Результати підбору цих емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наведено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{V}_{MEX}$
$\bar{V}_{MEX}$, <i>м / год</i>	47,95	50,33	51,89	53,30	56,59	60,75	0,9667 0,998<P<0,999	1,36<1,75
	12,35	13,97	15,82	19,88	21,18	21,78		
	$\bar{V}_{MEX} = -2305,31758 / \bar{n}_d + 60,87532$							
	1,806	1,83	2,026	2,051	2,099	0,9497 0,98<P<0,99	0,62<1,16	
	9,38	10,23	11,28	12,89	14,05			
	$\bar{V}_{MEX} = 1 / (-0,101745 \cdot \bar{F}_{ДОЛ} + 0,288)$							

За табл. 5.9 задовільні умови апроксимації виконуються, ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{V}_{MEX}$ та параметрами режиму буріння більша за 0,98 і ці залежності описуються гладкими “розумними” кривими. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{V}_{MEX}$ підтверджена.

За табл. 5.3, 5.5, 5.7 і 5.9 підбір залежності $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$, в діапазоні поглиблення свердловини 450-600 м проводиться за інтервалами відбору

геологічних досліджень, що дозволяє збільшити кількість однорідних лінійних ділянок з однаковими літологічними властивостями породи. При збільшенні таких ділянок підбір емпіричної залежності проводиться при більшому числі пар $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$, що підвищує ймовірність існування такої залежності.

За результатами досліджень впливу осьового навантаження на долото і його частоти обертання, які в процесі буріння є незалежними зовнішніми чинниками, на крутний момент на долоті [1,12,48] під час буріння шарошковими долотами встановлено, що із збільшенням осьового навантаження крутний момент зростає а із збільшенням частоти обертання - зменшується.

Результати досліджень для встановлення залежностей $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{T}_p = f(\bar{F}_{дол})$ при бурінні долотами стираюче-ріжучої дії PDC в науково-технічній літературі не виявлено, і тому, під час аналізу впливу параметрів режиму буріння на крутний момент на долоті будемо користуватися результатами підбору емпіричних кореляційних залежностей.

В табл. 5.10 наведено шість пар значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання частоти обертання.

Таблиця 5.10 – Експериментальні пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 33-253 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$

$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	29,33	40,34	44,35	45,19	45,75	46,93
$\bar{T}_p, \text{кН} \cdot \text{м}$	1,72	3,58	4,25	4,6	5,52	5,84

В табл. 5.11 наведено п'ять пар значень $\bar{T}_p$ і $\bar{F}_{дол}$ в порядку зростання осьового статичного навантаження.

Таблиця 5.11 – Експериментальні пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{F}_{дол}$ для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{T}_p = f(\bar{F}_{дол})$ в інтервалі заглиблення 33-253 м

$\bar{F}_{дол}$	1,1457	1,295	1,485	1,486	1,5137
$\bar{T}_p$	1,72	3,58	4,95	5,74	5,94

Таблиця 5.12 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 33-253 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_p$
T_p , кН·м	29,33	40,34	44,35	45,19	45,75	46,93	0,990 0,999<P<1,0	0,25<0,435
	1,72	3,58	4,95	4,6	5,53	5,74		
	$\bar{T}_p = \bar{n}_d / (-0,50549 \cdot \bar{n}_d + 31,81362)$							
	1,1457	1,295	1,485	1,486	1,5137	0,9844 0,99<P<0,998	0,31<0,44	
	1,72	3,58	4,95	5,74	5,94			
	$\bar{T}_p = -0,205256 + 14,34242 \cdot \ln \bar{F}_{\text{ДОЛ}}$							

В табл. 5.13 наведено пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання частоти обертання в інтервалі заглиблення 450-600 м.

Таблиця 5.13 – Експериментальні пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$

$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	47,95	48,29	51,89	52,51	60,75	61,21	62,57
$\bar{T}_p, \text{кН} \cdot \text{м}$	3,7	4,45	4,45	4,58	5,49	5,47	6,55

В табл. 5.14 наведено пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання осьового статичного навантаження в інтервалі заглиблення 450-600 м.

Таблиця 5.15 – Експериментальні пари значень $\bar{T}_p$ і $\bar{F}_{\text{ДОЛ}}$, в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{T}_p = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$

$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}$	1,606	1,806	1,83	2,009	2,026	2,099
$\bar{T}_p$	3,7	4,45	5,18	5,47	5,78	6,21

За наведеним матеріалом задовільні умови апроксимації виконуються, ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{T}_p$ та параметрами режиму буріння більша за 0,99 і ці залежності описуються гладкими “розумними” кривими. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_p$ підтверджена. Крутний момент ротора зростає із збільшенням осьового статичного навантаження на долото і його частоти обертання.

Таблиця 5.16 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 450-600 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності							Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_p$
$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	47,95	48,29	51,89	52,51	60,75	61,21	62,57	0,9262 0,99<P<0,998	0,33<0,50
	3,7	4,45	4,45	4,58	5,49	5,47	6,55		
	$\bar{T}_p = 1 / (-0,00565 \cdot \bar{n}_d + 0,51872)$								
$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}$	1,606	1,806	1,83	2,009	2,026	2,099		0,9709 0,998<P<0,999	0,18<0,41
	3,7	4,45	5,18	5,47	5,78	6,21			
	$\bar{T}_p = 1,54902 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}}^{1,86143}$								

Можна стверджувати, що залежності $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$, одержані при бурінні різними типами доліт представляють собою різні функції. При бурінні шарошковими долотами момент із збільшенням частоти обертання зменшується. Протилежний ефект одержаний при бурінні долотами PDC, якими були пробурені інтервали 33-253 м і 450-600 м свердловини Ужгородська 104 – із збільшенням частоти обертання момент зростає.

5.2 Адаптація критеріїв оцінки інтенсивності динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті, одержаних методом планованого факторного експерименту, до промислових умов

В розділі 5.1 встановлено повну відповідність між залежностями $\bar{V}_{\text{MEX}} = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{V}_{\text{MEX}} = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$, встановлених за даними свердловини Ужгородська 104 з використанням методики (див. розділ 2.3), і класичними залежностями, встановленими за результатами багаторічних досліджень впливу режиму буріння на механічну швидкість буріння. Цим підтверджується задовільне застосування методики для аналізу промислових даних.

В розділі 4 запропоновано оцінювати більш детально процес зміни крутного моменту на долоті за допомогою коефіцієнтів $K_{\text{ДИН.ІН}}$, $k_{\text{Т.д.мах}}$ та подвійної

амплітуди коливань моменту $2A_T$. За результатами стендових експериментальних досліджень були одержані емпіричні залежності $K_{\text{ДИН.ЛН}} = f(\bar{n}_d)$, $k_{T.\partial.\text{max}} = f(\bar{n}_d)$, $2A_T = f(\bar{n}_d)$, $K_{\text{ДИН.ЛН}} = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$, $k_{T.\partial.\text{max}} = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$ і $2A_T = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$.

Перевіримо можливість адаптації цих залежностей до таких же залежностей, одержаних за результатами буріння інтервалів 33-253 м і 450-600 м з використанням методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів процесу буріння глибоких нафтових і газових свердловин.

В табл. 5.17 наведено середні значення всіх вибірок параметрів режиму буріння і крутного моменту ротора $\bar{T}_P$ та показників $K_{\text{ДИН.ЛН}}$, $k_{T.\partial.\text{max}}$ і $2A_T$ в порядку зростання механічної швидкості буріння в інтервалі буріння 33-253 м.

Таблиця 5.17 – Середні значення всіх вибірок параметрів режиму буріння і крутного моменту ротора $\bar{T}_P$ та показників $K_{\text{ДИН.ЛН}}$, $k_{T.\partial.\text{max}}$ і $2A_T$ в порядку зростання механічної швидкості буріння

Позначення вибірки, інтервал заглиблення свердловини	$\bar{V}_{\text{МЕХ}},$ м / год	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$\bar{F}_{\text{ДОЛ}},$ тс	$\bar{T}_P,$ кН · м	$E_T,$ (кН · м) ²	$K_{\text{ДИН.ЛН}}$	$T_{\text{МАХ}}$	$k_{T.\partial.\text{max}}$	$2A_T$
ЛД.10 213-220	9,52	45,19	1,6486	4,6	2,4939	0,1178	7,19	2,5630	4,41
ЛД.2 47-54	11,10	29,33	1,1457	1,72	2,0638	0,6976	3,79	3,2035	2,87
ЛД.5 85-107	11,95	40,34	1,295	3,58	0,1378	0,0108	4,18	2,1676	1,2
ЛД.8 153-183	14,5	46,93	1,486	5,74	2,289	0,0064	7,43	2,2944	4,81
ЛД.11 223-253	14,97	45,57	1,6783	5,43	2,5402	0,0862	7,26	2,3370	4,89
ЛД.9 183-213	15,48	45,75	1,8867	5,53	1,931	0,0631	7,31	2,3219	4,18
ЛД.3 58-62	16,52	32,03	1,4325	1,52	0,00523	0,00226	1,6	2,0526	0,17
ЛД.6 118-122	16,52	44,35	1,485	4,95	0,00543	0,0003	5,03	2,0162	0,17
ЛД.7 123-153	17,05	43,69	1,5137	5,94	0,7895	0,0224	7,364	2,2397	3,33
ЛД.4 63-85	19,20	40,55	1,7182	2,3	0,1229	0,0232	2,86	2,2435	1,14
ЛД.1 37-43	31,84*	44,68	0,9283	6,08	1,7665	0,0478	7,32	2,2039	3,63

В табл. 5.18 наведено пари значень $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{n}_d$; $k_{T.\text{д.мак}}$ і $\bar{n}_d$ та $2A_T$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання частоти обертання для підбору емпіричних залежностей $K_{\text{дин.лн}} = f(\bar{n}_d)$, $k_{T.\text{д.мак}} = f(\bar{n}_d)$ і $2A_T = f(\bar{n}_d)$ за програмою App.1. Під час підбору експериментальних значень повинно виконуватись одне основне правило, а саме з – мінімальний об'єм пар $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{n}_d$; $k_{T.\text{д.мак}}$ і $\bar{n}_d$ та $2A_T$ і $\bar{n}_d$ повинен відповідати одним і тим же значенням частоти обертання.

Таблиця 5.18 – Експериментальні пари значень $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{n}_d$, $k_{T.\text{д.мак}}$ і $\bar{n}_d$, $2A_T$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 33-253 м для підбору емпіричних рівнянь регресії

$\bar{n}_d$	32,03	40,34	40,55	43,69	44,68	45,75	46,93
$K_{\text{дин.лн}}$	-	0,0108	0,0232	0,0224	0,0478	0,0631	0,0694
$k_{T.\text{д.мак}}$	2,0526	-	2,1676		2,2039	2,3219	2,2944
$2A_T$	0,17	1,2	1,14		3,63	4,18	4,81

Таблиця 5.19 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 33-253 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_p$
$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	40,55	44,68	45,75	46,93		0,9998 0,999<P<1,0	0,003<0,005
	0,0232	0,0478	0,0631	0,0694			
	$K_{\text{дин.лн}} = 8,664259 \cdot 10^{-15} \cdot \bar{n}_d^{7,729256}$						
	32,03	40,55	44,68	45,75	46,93	0,9506 0,99<P<0,998	0,04<0,22
	2,0526	2,1676	2,2039	2,3219	2,2944		
	$k_{T.\text{д.мак}} = \bar{n}_d / (0,322968 \cdot \bar{n}_d + 5,38779)$						
	32,03	40,34	40,55	44,68	45,75	0,9967 0,998<P<0,999	0,24<0,25
	0,17	1,2	1,14	3,63	4,18		
	$2A_T = 4,494455 \cdot 10^{-15} \cdot \bar{n}_d^{9,002633}$						

В табл. 5.20 наведено пари значень $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$; k і $\bar{F}_{\text{дол}}$ та $2A_T$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$ в порядку зростання осьового статичного навантаження для підбору емпіричних

залежностей $K_{\text{дин.лн}} = f(\bar{n}_d)$, $k_{\text{т.д.мах}} = f(\bar{n}_d)$ і $2A_T = f(\bar{n}_d)$ за програмою App.1. Під час підбору експериментальних значень повинно виконуватись одне основне правило, а саме – мінімальний об'єм пар $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$; k і $\bar{F}_{\text{дол}}$ та $2A_T$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$ повинен відповідати одним і тим же значенням статичного осьового навантаження.

Таблиця 5.20 – Експериментальні пари значень $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, $k_{\text{т.д.мах}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, $2A_T$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, в інтервалі заглиблення 33-253 м для підбору емпіричних рівнянь регресії

$\bar{F}_{\text{дол}}$	1,1457	1,295	1,4325	1,485	1,5137	1,6486	1,6783	1,7182	1,8867
$K_{\text{дин.лн}}$	-	0,0108	-	-	0,0224	-	-	0,0232	0,0562
$k_{\text{т.д.мах}}$	-	2,166	2,0526	2,0162	2,2397			2,2435	2,2961
$2A_T$	2,87	-	-	-	3,33	4,41	4,89		-

Таблиця 5.21 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 33-253 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{\Gamma}_p$
$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}$	1,295	1,5137	1,7182	1,8867			$P=1$	$1,8 \cdot 10^{-23} < 0,004$
	0,0108	0,0224	0,0232	0,0562				
	$K_{\text{ДИН.ЛН}} = -3876284 + 7,6120342 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}} - 4,94103 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}}^2 + 1,0658378 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}}^3$							
	1,295	1,4325	1,485	1,5137	1,7182	1,8867	$0,9967$ $0,999 < P < 1,0$	$0,09 < 0,22$
	2,166	2,0526	2,0162	2,2397	2,2435	2,2961		
	$k_{T.\partial.\text{max}.f} = -0,90482 / \bar{F}_{\text{ДОЛ}} + 2,758716$							

Підібрати емпіричну залежність $2A_T = f(\bar{F}_{\text{дол}})$ за мінімальною кількістю пар експериментальних значень, для значень осьового статичного навантаження на долото 1,295 ; 1,5137; 1,7182 і 1,8867 не вдалось.

Таблиця 5.22 – Інтервали лінійних ділянок в діапазоні заглиблення 450-600 м і статистичні характеристики вибірок осевого навантаження на долото і крутного моменту на долоті виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення вибірок $\bar{V}_{MEH}$

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEH},$ м / год	$\bar{F}_{ДОЛ}, мс$	$\bar{n}_d,$ $хв^{-1}$	$\bar{T}_P,$ $кН \cdot м$	$E_T,$ $(кН \cdot м)^2$	$K_{ДИН.ЛН}$	T_{MAX}	$k_{T.д. max}$	$2A_T$
3ГІ 475-480	9,38	1,806	48,29	4,45	3,5438	0,1790	7,25	2,6292	5,15
7ГІ.1 510-514	10,23	1,83	51,72	5,18	4,5655	0,1701	7,0	2,3514	4,32
8ГІ 520-525	11,28	2,026	52,83	5,78	1,4547	0,0435	7,21	2,2474	2,98
2ГІ.2 465-470	12,35	1,606	47,95	3,7	5,0652	0,3670	6,64	2,7946	5,15
6ГІ 501-510	12,89	2,0511	52,51	4,58	2,8456	0,1356	7,23	2,5786	4,46
5ГІ 490-500	13,97	2,003	50,33	5,12	4,9049	0,1871	7,26	2,4180	5,86
4ГІ 480-490	14,05	2,099	45,77	6,21	1,5068	0,0391	7,34	2,1820	3,6
12ГІ 560-566	14,21	1,55	65,41	5,94	2,4373	0,0691	7,32	2,2323	3,25
7ГІ.2 514-520	15,82	1,9833	51,89	4,45	0,8381	0,0423	6,02	2,3528	2,49
10ГІ 541-550	16,01	2,009	61,21	5,47	3,0702	0,1026	7,3	2,3346	3,96
13ГІ 570-580	17,16	1,205	60,72	5,67	3,1008	0,0964	7,31	2,2892	4,15
9ГІ 536-540	19,88	1,4025	53,30	6,14	1,7546	0,0465	7,25	2,1808	2,67
14ГІ 580-590	20,03	1,352	62,57	6,55	0,7822	0,0182	7,31	2,1160	2,37
15ГІ 590-600	21,18	1,115	56,59	5,83	2,9118	0,0857	7,3	2,2521	4,54
11ГІ 550-555	21,78	1,1	60,75	5,49	0,3819	0,0127	6,13	2,1166	1,62
2ГІ.1 461-465	30,50	0,93	43,92	4,86	2,5950	0,1099	6,73	2,3848	3,93

Примітка: ГІ – аббревіатура інтервалу геологічних досліджень

Таблиця 5.23 – Експериментальні пари значень $K_{\text{дин.ін}}$ і $\bar{n}_d$, $k_{T.\text{д.мак}}$ і $\bar{n}_d$ та $2A_T$ і $\bar{n}_d$ в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричних рівнянь регресії

$\bar{n}_d$	45,77	51,89	52,83	53,30	56,59	60,72	61,21
$K_{\text{дин.ін}}$	0,0391	0,0423	0,0435	0,0465	0,0857	0,0964	0,1026
$k_{T.\text{д.мак}}$	2,1820	2,3528	2,2474	2,1808	2,2521	2,2892	2,3346
$2A_T$	3,6	2,49	2,98	2,67	4,54	4,15	3,96

Таблиця 5.24 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 450-600 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності							Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_P$
$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	45,77	51,89	52,83	53,30	56,59	60,72	61,21	0,9837 0,999<P<1,0	0,006<0,007
	0,0391	0,0423	0,0435	0,0465	0,0857	0,0964	0,1026		
	$K_{\text{дин.ін.}} = -21,43255 / \bar{n}_d + 0,45329$								
	45,77	51,89	52,83	53,30	56,59	60,72	61,21	0,9787 0,999<P<1,0	0,06<0,23
	2,1820	2,3528	2,2474	2,1808	2,2521	2,2892	2,3346		
	$k_{T.\text{д.мак}} = -20,014 / \cdot \bar{n}_d + 2,63233$								
	51,89	52,83	53,30	60,72	61,21	0,9862 0,998<P<0,999		0,24<0,25	
	2,49	2,98	2,67	4,15	3,96				
	$2A_T = -516,19538 / \cdot \bar{n}_d + 12,51762$								

Таблиця 5.25 – Експериментальні пари значень $K_{\text{дин.ін}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, $k_{T.\text{д.мак}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, $2A_T$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$, в інтервалі заглиблення 450-600 м для підбору емпіричних рівнянь регресії

$\bar{F}_{\text{дол}}$	1,1	1,352	1,4025	1,55	1,83	2,003
$K_{\text{дин.ін}}$	0,0127	0,0182	0,0465	0,0691	0,1701	0,1871
$k_{T.\text{д.мак}}$	2,1166	2,1622	2,1808	2,2323	2,3514	2,4180
$2A_T$	1,62	2,37	2,67	3,25	4,32	5,86

В табл. 5.25 наведено пари значень $K_{\text{дин.лн}}$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$; k і $\bar{F}_{\text{дол}}$ та $2A_T$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$ в інтервалі заглиблення 450-600 м.

Таблиця 5.26 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних в інтервалі заглиблення 450-600 м

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_P$
$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}$	1,352	1,4025	1,55	1,83	2,003		0,9924 0,999<P<1,0	0,009<0,01
	0,0182	0,0465	0,0691	0,1701	0,1871			
	$K_{\text{ДИН.ЛН}} = -0,7275 / \bar{F}_{\text{ДОЛ}} + 0,55321$							
	1,1	1,352	1,4025	1,55	1,83	2,003	0,9922 0,999<P<1,0	0,01<0,22
	2,1166	2,1622	2,1808	2,2323	2,3514	2,4180		
	$k_{T.\text{д. max}} = 1 / (-0,06868 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}} + 0,55248)$							
	1,1	1,352	1,4025	1,55	1,83	2,003	0,9964 0,999<P<1,0	0,14<0,33
	1,62	2,37	2,67	3,25	4,32	5,86		
	$2A_T = -8,207798 + 9,2254\sqrt{\bar{F}_{\text{ДОЛ}}}$							

За результатами експериментальних стендових досліджень було одержано залежності $K_{\text{дин.лн.ф}} = f(n)$ і $K_{\text{дин.лн.ф}} = f(F_{\text{ст}})$. За цими залежностями із збільшенням значень параметрів режиму буріння величина $K_{\text{дин.лн}}$ зростає. За табл. 5.19, 5.21, 5.24 і 5.26 аналогічний висновок можна зробити за результатами аналізу промислових даних, одержаних при застосуванні методики. За цим адаптацію результатів стендових експериментальних досліджень до промислових умов можна вважати задовільною. Такий же висновок можна зробити за результатами адаптації стендових емпіричних залежностей $k_{T.\text{дин.мах.ф}} = f(n)$, $k_{T.\text{дин.мах.ф}} = f(F_{\text{ст}})$ і $2A_T = f(n)$ та $2A_T = f(F_{\text{ст}})$ до промислових умов. При апроксимації емпіричними залежностями за табл. 5.19, 5.21, 5.24 і 5.26 кращу достовірність цих залежностей одержано для однорідних лінійних ділянок, які комплектуються за однаковими за своїми літологічними властивостями порід.

5.3 Встановлення залежностей між параметрами режиму буріння, критеріями оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за даними пробурених свердловин

Одним із головних завдань буріння свердловин є визначення витрати енергії на руйнування гірської породи. Ця витрата називається енергоємністю процесу буріння. Порівняльна оцінка впливу різних факторів на енергоємність процесу руйнування гірських порід здійснюється за величиною питомої об'ємної роботи W_{II} , яка витрачається на руйнування 1 см³ гірської породи. Ця робота визначається за формулою

$$W_{II} = \frac{W}{V}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^3; \quad (5.1)$$

де W – загальна робота під час руйнування породи; V – об'єм зруйнованої породи.

$$W = P \cdot t_{\delta}, \text{Н} \cdot \text{м} (\text{Дж}); \quad (5.2)$$

де P – потужність на долоті, яка витрачається на руйнування гірської породи; t_{δ} – час буріння, с.

$$P = T_{CP} \cdot \omega_{\delta} = T_{CP} \cdot \frac{\pi \cdot n_{\delta}}{30}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{с}; \quad (5.3)$$

де T_{CP} – середнє значення крутного моменту на долоті (моментоемність), кГ·м; n_{δ} – частота обертання долота, хв.⁻¹.

$$V = H_B \cdot A, \text{см}^3; \quad (5.4)$$

де A – площа вибою, см².

Заглиблення долота H_B за час буріння t_{δ} (проходка на долото), визначається за формулою

$$H_B = v_m \cdot t_{\delta}, \text{см}; \quad (5.5)$$

де v_m – механічна швидкість буріння, см/с.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \text{см}^2; \quad (5.6)$$

де D – діаметр свердловини. Орієнтовно $D \cong d_{\delta}, \text{см}$, де d_{δ} – діаметр долота, см.

Підставляємо рівняння (2)-(6) в (1)

$$W_{II} = \frac{P \cdot t_{\delta}}{H_B \cdot A} = \frac{T_{CP} \cdot \omega_{\delta} \cdot t_{\delta}}{v_m \cdot t_{\delta} \cdot A} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\delta} \cdot t_{\delta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\delta} \cdot \pi \cdot d_{\delta}^2} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot n_{\delta}}{30 \cdot v_m \cdot d_{\delta}^2}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^3. \quad (5.7)$$

При переході від механічної швидкості від розмірності см/с до м/год формула бути мати вигляд

$$W_{II} = 48 \frac{T_{CP} \cdot n_{\delta}}{v_m \cdot d_{\delta}^2}, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3; n_{\delta}, \text{хв}^{-1}; v_m, \text{м} / \text{год}; d_{\delta}^2, \text{см}^2. \quad (5.8)$$

Для встановлення впливу режиму буріння, критеріїв оцінки динамічності процесу зміни крутного моменту на долоті на енергоємність руйнування гірської породи, було проаналізовано процес поглиблення закінченої свердловини Ужгородська 104 в інтервалі 480-1240 м. Діапазон був розбитий на 10-ти метрові інтервали в яких, одночасно з бурінням вівся геологічний журнал з результатами аналізу відібраного шламу. В табл. 5.27 наведено середні арифметичні вибірки дискретних значень технологічних параметрів буріння та енергоємності руйнування гірської породи в діапазоні заглиблення 480-1240 м в порядку зростання середнього арифметичного v_m . Аналізовані геологічні інтервали (ГІ) складені тільки аргілітами (100% глина сіра). В табл. 5.27 ГІ – аббревіатура геологічного інтервалу; ГС – аббревіатура генеральної сукупності; n – об'єм вибірок дискретних значень технологічних параметрів і енергоємності; $\bar{V}_{MEH}, \bar{n}_d, \bar{F}_{ДОЛ}, \bar{T}_P$ і $\bar{W}_{II}$ – середні значення вибірок механічної швидкості, частоти обертання, осьового навантаження, крутного моменту і енергоємності. За результатами досліджень впливу режимних параметрів, $\bar{F}_{ДОЛ}$ і $\bar{n}_d$, які в процесі буріння є незалежними зовнішніми чинниками, на енергоємність руйнування гірської породи [32,56] під час буріння шарошковими долотами встановлено, що із збільшенням осьового навантаження енергоємність зменшується а із збільшенням частоти обертання зростає. Результати досліджень для встановлення залежностей $\bar{W}_{II} = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{W}_{II} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ при бурінні долотами стираюче-ріжучої дії в літературі не виявлено, тому приймаємо гіпотезу про однаковий вплив параметрів буріння на W_{II} , долотами різних типів за якою вона зменшується при збільшенні $\bar{F}_{ДОЛ}$ і $\bar{n}_d$. і при зростає збільшенні $\bar{n}_d$.

Таблиця 5.27 – Однорідні лінійні ділянки, генеральні сукупності, за цими ділянками, і середні арифметичні вибірок дискретних значень технологічних параметрів буріння в інтервалі 480-1240 м закінченої свердловини Ужгородська 104 в порядку зростання середнього арифметичного механічної швидкості буріння, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	ГС	n	$\bar{V}_{MEH},$ $м / год$	$\bar{n}_d, хв^{-1}$	$\bar{F}_{ДОЛ},$ $тс$	$\bar{T}_P, кН \cdot м$ $T_{P.МИН} \dots T_{P.МАХ}$	$\bar{W}_П,$ $Н \cdot м / см^3$
14ГІ 871-880	1	9	6,35	58,34	1,48	3,87 2,44-4,99	4892
18ГІ 1030-1040	2	10	8,5	64,17	2,0	5,59 3,28-8,05	4378
13ГІ.2 796-800	2.1	4	9,15	56,03	1,51	6,58 4,23-8,81	4509
16ГІ 942-950	2.2	8	9,81	58,14	1,47	4,49 2,9-6,04	3140
10ГІ 674-680	2.3	6	10,09	60,97	1,61	4,72 2,77-7,32	3112
11ГІ 680-689	2.4	9	10,27	69,85	1,44	6,6 4,77-7,26	4481
19ГІ 1230-1240	2.5	10	10,38	62,98	2,41	9,10 4,62-13,82	6667
15ГІ 920-930	3	10	10,66	59,5	1,61	6,90 3,56-11,68	4126
7ГІ 640-646	3.1	6	10,98	58,23	1,54	4,22 2,14-5,97	2356
5ГІ 620-631	3.2	11	11,26	50,4	1,78	4,98 2,31-6,84	2263
9ГІ 663-670	3.3	7	12,76	56,72	1,31	5,74 2,9-7,24	2488
12ГІ 690-700	4	10	13,7	65,33	1,36	5,25 2,1-7,29	2382
2ГІ 490-500	4.1	10	13,90	50,33	2,0	5,12 1,4-7,26	1994
17ГІ 1030-1040	4.2	10	13,99	57,78	1,63	5,6 3,73-10,1	2577
1ГІ 480-490	4.3	9	14,05	46,11	2,04	6,07 3,74-7,17	1970

6ГІ 631-640	4.4	9	14,15	57,24	1,89	5,06 2,06-7,33	2190
8ГІ 64-660	4.5	13	14,37	57,04	1,57	6,57 4,74-7,34	2674
13ГІ.1 790-796 4ГІ 610-620	5	15	15,07	57,22	1,30	5,0 3,07-6,86	1975
3ГІ 580-590	6	10	20,03	62,52	1,35	6,55 4,94-7,31	2156

В табл. 5.28 наведено шість пар значень $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{n}_d$ в порядку зростання середнього значення вибірок дискретних значень частоти обертання.

Таблиця 5.28 – Експериментальні пари значень $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{n}_d$ для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{W}_\Pi = f(\bar{n}_d)$

$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	46,11	50,33	50,4	56,72	57,78	60,17
$\bar{W}_\Pi, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3$	1970	1994	2263	2488	2577	3112

В табл. 5.29 наведено шість пар значень $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$ в порядку зростання середнього значення вибірок дискретних значень частоти обертання.

Таблиця 5.29 – Експериментальні пари значень $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{F}_{\text{дол}}$ для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{W}_\Pi = f(\bar{F}_{\text{дол}})$

$\bar{F}_{\text{дол}}, \text{мс}$	1,47	1,57	1,63	1,78	1,89	2,0	2,04
$\bar{W}_\Pi, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3$	3140	2674	2577	2263	2190	4378	1970

Таблиця 5.30 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{V}_{\text{MEX}}$
$\bar{W}_\Pi,$	46,11	50,33	50,4	56,72	57,78	60,17	0,951	122<240
	1970	1994	2263	2488	2577	3112	0,99<P<0,998	

Н·м/см³	$\bar{W}_\Pi = 1 / -1,20835 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{n}_d + 0,001076$								
	1,47	1,57	1,63	1,78	1,89	2,0	2,04	0,9983 0,999<P<1,0	43<240
	3140	2674	2577	2263	2190	4378	1970		
	$\bar{W}_\Pi = \bar{F}_{\text{ДОЛ}} / 0,000976 \cdot \bar{F}_{\text{ДОЛ}} - 0,000954$								

За наведеним вище матеріалом задовільні умови апроксимації виконуються, ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{W}_\Pi$ та параметрами режиму буріння більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими “розумними” кривими. Умова $\sigma_0 < 0,1\bar{T}_p$ підтверджена.

За табл. 5.30 можна стверджувати що закономірності зміни залежностей $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{n}_d$ і $\bar{W}_\Pi = f(\bar{F}_{\text{ДОЛ}})$ підтверджують висновок інших дослідників, за яким із збільшенням осьового навантаження енергоємність процесу руйнування гірської породи зменшується а із збільшенням частоти обертання збільшується, тобто використання запропонованої методики аналізу промислових даних задовільне [59].

В табл. 5.31 наведено середні значення всіх вибірок параметрів режиму буріння і крутного моменту ротора $\bar{T}_p$ та показників $K_{\text{ДИН.ЛН}}$, $k_{T.\partial.\text{max}}$ і $2A_T$ в порядку зростання механічної швидкості буріння в інтервалі буріння 480-1240 м.

Для встановлення емпіричної залежності $\bar{W}_\Pi = f(K_{\text{ДИН.ЛН}})$ в табл. 5.32 наведено значення цього коефіцієнта в порядку його зростання і відповідні цим значенням величини енергоємності $\bar{W}_\Pi$. Для встановлення залежностей $\bar{W}_\Pi = f(k_{T.\partial.\text{max}})$ і $\bar{W}_\Pi = f(2A_T)$ відповідні значення цих величин наведено в табл. 5.33 і 5.34.

Таблиця 5.31 – Середні значення всіх вибірок параметрів режиму буріння і крутного моменту ротора $\bar{T}_p$ та показників $K_{\text{ДИН.ЛН}}$, $k_{T.\partial.\text{max}}$ і $2A_T$ в порядку зростання механічної швидкості буріння

Позначення і інтервал заглиблення свердловини	$\bar{V}_{\text{МЕХ}},$ м / год	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$\bar{F}_{\text{ДОЛ}},$ тс	$K_{\text{ДИН.ЛН}}$	$T_{\text{МАХ}}$	$k_{T.\partial.\text{max}}$	$2A_T$	$\bar{W}_\Pi,$ Н·м/см ³
14ГІ 871-880	6,35	58,34	1,48	0,0571	4,99	2,2894	2,55	4892

18ГІ 1030-1040	8,5	64,17	2,0	0,0700	8,05	2,4401	4,77	4378
13ГІ.2 796-800	9,15	56,03	1,51	0,0983	8,81	2,3389	4,58	4509
16ГІ 942-950	9,81	58,14	1,47	0,0555	6,04	2,3452	3,14	3140
10ГІ 674-680	10,09	60,97	1,61	0,1361	7,32	2,5508	4,55	3112
11ГІ 680-689	10,27	69,85	1,44	0,0155	7,26	2,1	2,49	4481
19ГІ 1230-1240	10,38	62,98	2,41	0,0973	13,82	2,5187	9,2	6667
15ГІ 920-930	10,66	59,5	1,61	0,1535	11,68	2,6928	8,12	4126
7ГІ 640-646	10,98	58,23	1,54	0,1103	5,97	2,4147	3,83	2356
5ГІ 620-631	19,20	50,4	1,78	0,0802	6,84	2,3735	4,53	2263
9ГІ 663-670	31,84	56,72	1,31	0,0972	7,24	2,2613	4,34	2488
12ГІ 690-700	13,7	65,33	1,36	0,1585	7,29	2,3886	5,19	2382
2ГІ 490-500	13,90	50,33	2,0	0,1871	7,26	2,4180	5,86	1994
17ГІ 1030-1040	13,99	57,78	1,63	0,1756	10,1	2,8036	6,37	2577
1ГІ 480-490	14,05	46,11	2,04	0,0415	7,17	2,1812	3,43	1970
6ГІ 631-640	14,15	57,24	1,89	0,1195	7,33	2,4486	5,27	2190
8ГІ 647-660	14,37	57,04	1,57	0,01828	7,34	2,1172	2,6	2674
13ГІ.1 790-796 4ГІ – 610-620	15,07	57,22	1,30	0,0712	6,86	2,372	3,79	1975
3ГІ 580-590	20,03	62,52	1,35	0,1823	7,31	2,1160	2,37	2156

Таблиця 5.32 – Експериментальні пари значень $\bar{W}_{II}$ і $K_{дин.ін}$ в інтервалі заглиблення

480-1240 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{W}_{II} = f(K_{дин.ін})$

$K_{дин.ін}$	0,0155	0,0183	0,0415	0,0555	0,0571	0,0700	0,0712	0,0802	0,0972	0,0973	0,0983
$\bar{W}_{II}$	4481	2674	1970	3140	4892	4378	1975	2263	2488	6667	4509
$K_{дин.ін}$	0,1103	0,1195	0,1361	0,1535	0,1585	0,1756	0,1871	0,1823			
$\bar{W}_{II}$	2356	2190	3112	4126	2382	2577	1994	2156			

Таблиця 5.33 – Експериментальні пари значень $\bar{W}_\Pi$ і $K_{\text{дин.лн}}$ в інтервалі заглиблення 480-1240 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{W}_\Pi = f(k_{T.\partial.\text{max}})$

$k_{T.\partial.\text{max}}$	2,1	2,116	2,1172	2,1812	2,2613	2,2894	2,3389	2,3452	2,372	2,3735	2,3886
$\bar{W}_\Pi$	4481	1994	2674	1970	2488	4892	4509	3140	1975	2263	2382
$k_{T.\partial.\text{max}}$	2,4147	2,4280	2,4401	2,4486	2,5187	2,5508	2,6928	2,8036			
$\bar{W}_\Pi$	2356	2156	4378	2190	6667	3112	4126	2577			

Таблиця 5.34 – Експериментальні пари значень $\bar{W}_\Pi$ і $2A_T$ в інтервалі заглиблення 480-1240 м для підбору емпіричного рівняння регресії $\bar{W}_\Pi = f(2A_T)$

$2A_T$	2,37	2,49	2,55	2,6	3,14	3,43	3,79	3,83	4,34	4,53	4,55
$\bar{W}_\Pi$	1994	4481	4892	2674	3140	1970	1975	2356	2488	2263	3112
$2A_T$	4,58	4,77	5,19	5,27	5,86	6,37	8,12	9,2			
$\bar{W}_\Pi$	4509	4378	2382	2190	2156	2577	4126	6667			

Таблиця 5.35 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей $\bar{W}_\Pi = f(K_{\text{дин.лн}})$, $\bar{W}_\Pi = f(k_{T.\partial.\text{max}})$ і $\bar{W}_\Pi = f(2A_T)$ та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності						Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови
$\bar{W}_\Pi$	0,0155	0,0555	0,0972	0,1103	0,1195	0,1871	0,995 0,999<P<1,0	$\sigma_0 < 0,1\bar{K}_{\text{ДИН.ЛН}}$ 92<277,5
	4481	3140	2488	2356	2190	1994		
	$K_{\text{ДИН.ЛН}} = 88,13212 - 1047,0875 \cdot \ln \bar{W}_\Pi$							
	2,1812	2,372	2,3735	2,3886	2,4147	2,5508	0,9376 0,998<P<0,999	$\sigma_0 < 0,1\bar{k}_{\text{Т.д.маx}}$ 182<260
	1970	1975	2263	2382	2356	3112		
	$k_{\text{Т.д.маx.ф}} = 1 / -0,000566 \cdot \bar{W}_\Pi + 0,00017817$							
	3,43	3,79	3,83	4,34	4,55	8,12	0,9964 0,999<P<1,0	$\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ 203<267
	3,43	3,79	3,83	4,34	4,55	8,12		
	$2A_T = -13498,221 / \bar{W}_\Pi + 5798,852$							

В табл. 5.35 наведено результати підбору частинних емпіричних залежностей $\bar{W}_\Pi = f(K_{\text{дин.лн}})$, $\bar{W}_\Pi = f(k_{T.\text{д.мак}})$ і $\bar{W}_\Pi = f(2A_T)$ та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних за якими проводився підбір цих залежностей, табл. 5.32-5.34.

За наведеним матеріалом задовільні умови апроксимації виконуються, ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{W}_\Pi$ та коефіцієнтами оцінки інтенсивності процесу зміни крутного моменту на долоті і подвійною амплітудою більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умови $\sigma_0 < 0,1\bar{K}_{\text{дин.лн}}$, $\sigma_0 < 0,1\bar{k}_{T.\text{д.мак}}$ і $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ підтверджені. За табл. 5.35 збільшення коефіцієнту $K_{\text{дин.лн}}$ приводить до зменшення енергоємності процесу руйнування гірської породи. За формулою $K_{\text{дин.лн}} = \frac{E_T}{(\bar{T}_\text{д})^2}$ збільшення величини $K_{\text{дин.лн}}$ досягається у випадку зростання загальної енергії процесу зміни крутного моменту або під час зменшення величини крутного моменту. Для випадку коли одночасно зростає величина E_T і $\bar{T}_\text{д}$ збільшення $K_{\text{дин.лн}}$ можливе у випадку більш інтенсивного зростання E_T у порівнянні з ростом $\bar{T}_\text{д}$. Згідно [2] змінюючи жорсткість КНБК можна досягнути максимальної величини E_T для конкретних умов процесу буріння. Другими словами раціональне використання в КНБК пристроїв зміни її жорсткості зменшує енергоємність процесу руйнування породи і як наслідок зниження енергозатратності будівництва свердловин.

Зміну енергоємності при використанні різних режимів буріння і застосування нових методів процесу буріння можна прогнозувати за наявною інформацією їх впливу на процес зміни коефіцієнту $k_{T.\text{д.мак}}$ і величини $2A_T$, при їх зростанні $\bar{W}_\Pi$ збільшується, при зменшенні – понижується

5.4 Розробка пристроїв зміни крутильної жорсткості і коефіцієнта демпфування компонування низу бурильної колони при бурінні у промислових умовах

В [1] за результатами аналізу багаторічних досліджень процесу буріння глибоких нафтових і газових свердловин з використанням віброзахисних пристроїв (ВЗП), основною причиною застосування яких в компонованні низу бурильної колони є захист від шкідливої дії вібрації підземного та наземного обладнання свердловини, встановлено також їх вплив на механічну швидкість буріння. Детальне дослідження цього впливу на буровому стенді ІФДНУНГ [13] при застосуванні планового експерименту, розробленого на основі греко-латинського квадрата 4х4, дозволило встановити багатофакторні емпіричні моделі нелінійної кореляції між інтегральними показниками процесу руйнування гірської породи, до яких віднесено механічну швидкість буріння, середнє значення (моментоемність) крутного моменту на долоті і енергоемність процесу руйнування гірської породи, та зовнішніми незалежними чинниками, параметрами процесу буріння (осьовим навантаженням на долото і частотою його обертання) та параметрами компоновання бурильного інструменту (жорсткістю C і коефіцієнтом демпфування β). За цими моделями було встановлено, що механічна швидкість і моментоемність при збільшенні жорсткості зростають, а при збільшенні коефіцієнта демпфування зменшуються. При зміні жорсткості, в інтервалі її значень, зафіксований мінімум енергоемності процесу руйнування породи, а із збільшенням демпфування енергоемність зменшується.

Під час проведення досліджень процесу зміни крутного моменту на долоті параметри компоновання бурильного інструменту C і β це – незалежні зовнішні чинники (фактори), які можуть змінюватись незалежно одне від одного. В розділі 3 під час аналізу цих досліджень встановлено, що мінімум енергоемності знаходиться в тому ж діапазоні фіксованих значень жорсткості, в якому знаходяться максимуми загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті і енергії зубцевих коливань долота.

В [1] проведено аналіз значної кількості ВЗП, які називаються амортизаторами. За цим аналізом не виявлено конструкцій амортизаторів, які б дозволяли змінювати жорсткість і коефіцієнт пружного елементу незалежно одне від одного. Проаналізовані амортизатори крутильних коливань за конструкцією пружного елемента поділяються на еластичні, основним параметром яких є коефіцієнт

демпфування при незначній величині їх жорсткості, та металічні, основним параметром яких є жорсткість при практично відсутньому демпфуванні. За результатами аналізу існуючих конструкцій амортизаторів крутильних коливань, також конструкцій муфт, які використовуються в машинобудуванні [14], вибрано три аналоги для розробки нової конструкції амортизатора крутильних коливань, в якій пружний елемент складався з двох частин – металічної з лінійною характеристикою, яка характеризується тільки одним параметром жорсткістю, та еластичної, характеристика якої нелінійна, а і її основний параметр - коефіцієнт демпфування. Параметри частин пружного елемента такого амортизатора можна змінювати незалежно один від одного. Аналогом металічної частини пружного елемента амортизатора вибрано муфту з пакетами плоских пружин, розміщених паралельно осі вала, фірми “Waldron” [14], рис. 5.1.

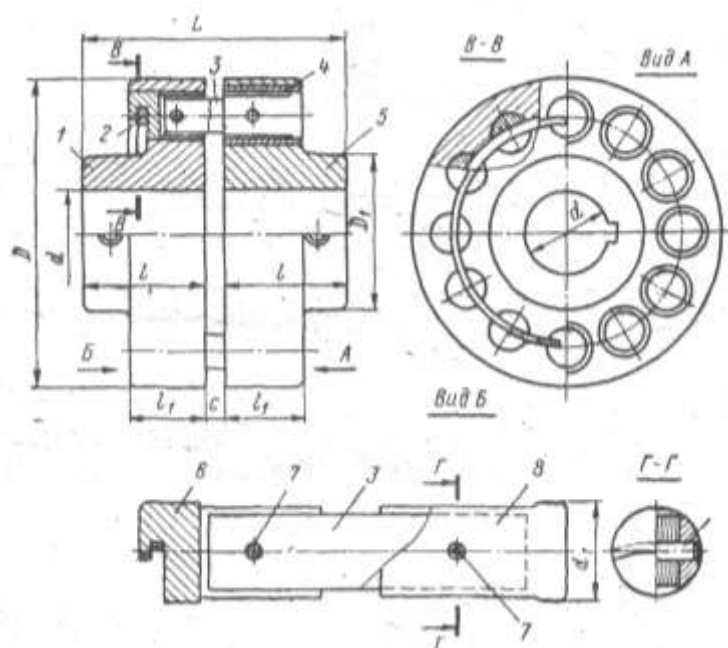


Рисунок 5.1 – Конструкція муфти з пакетами плоских пружин, розміщених паралельно осі вала

На рис. 5.1 півмуфти 1 і 5 з'єднані пружними елементами 3, які представляють собою пакети плоских пружин. Кінці пакетів утримуються у хвостовиках 6 і 8 штифтами 7. Пакети пружин одним кінцем кріпляться у півмуфті 1 за допомогою пружинного кільця 2 і вільно вставляються у отвори півмуфти 5. Для підвищення довговічності муфти у отвори півмуфти 5 запресовані втулки 4 з антифрикційного матеріалу. Аналогом еластичної частини пружного елемента вибрано муфту УМ-180

[15], рис. 5.2, яка пройшла промислові випробування під час буріння вибухових свердловин на кар'єрах нерудних копалин ВУ "Карпативибухпром" і рекомендована до серійного виготовлення. Муфта складається з корпусу 2, шліцьового вала 6, між якими розміщені секції, в які входять внутрішня 5 та зовнішня 4 обойми. З'єднання обойми 5 з валом 6 та обойми 4 з корпусом 2 – шліцьові. Між обоймами розміщена пружна еластична втулка 3 з зовнішніми та внутрішніми прорізами. Під час передачі крутного моменту від корпусу 2 до вала 1 і 6 втулка знаходиться у складному напруженому стані. Частина втулки, яка знаходиться між боковими поверхнями кулачків обойм, працює на стиск, а ділянки втулки, які розміщені між торцевими поверхнями кулачків обойм, працюють на зсув внаслідок сили попереднього стиску втулок 3. Осьове статичне навантаження передається долоту через упорний кульковий підшипник 8, центрування якого забезпечується втулками 7 і 9. За такими аналогами міняючи кількість плоских пружин в пакеті можна змінюючи крутильну жорсткість, не впливаючи на коефіцієнт демпфування, який визначається кількістю пружних еластичних втулок 3, рис. 5.2. Пропонований амортизатор крутильних коливань (рис.5.3) складається з корпусу 1, шліцьового нижнього вала 2, внутрішньої шліцьової обойми 3 нижньої секції пружного елемента та зовнішньої шліцьової обойми 4 нижньої секції пружного елемента, пакетів плоских пружин 5, штифтів 6, пружинного кільця 7, розрізного пружинного кільця 8, різьбової гайки 9, центрувальних внутрішньої 10 і зовнішньої 11 втулок нижнього підшипникового вузла нижнього упорного кулькового підшипника 12, різьбової гайки 13, шліцьової втулки 14, пакету тарілкових пружин 15, диску 16, опорних дисків 17, зовнішніх фрикційних дисків 18, внутрішніх фрикційних дисків 19, пружинного кільця 20, верхнього шліцьового вала 21, внутрішньої обойми верхньої секції пружного елемента 22, зовнішньої обойми верхньої секції пружного елемента 23, пружної еластичної втулки 24 (рис.5.4) із зовнішніми 29 і внутрішніми прорізами 30, центрувальних внутрішньої 25 і зовнішньої 26 втулок верхнього підшипникового вузла, нижнього упорного кулькового підшипника 27, різьбового перехідника 28. Нижня і верхня секції пружного елемента взаємодіють між собою через фрикційну муфту 31.

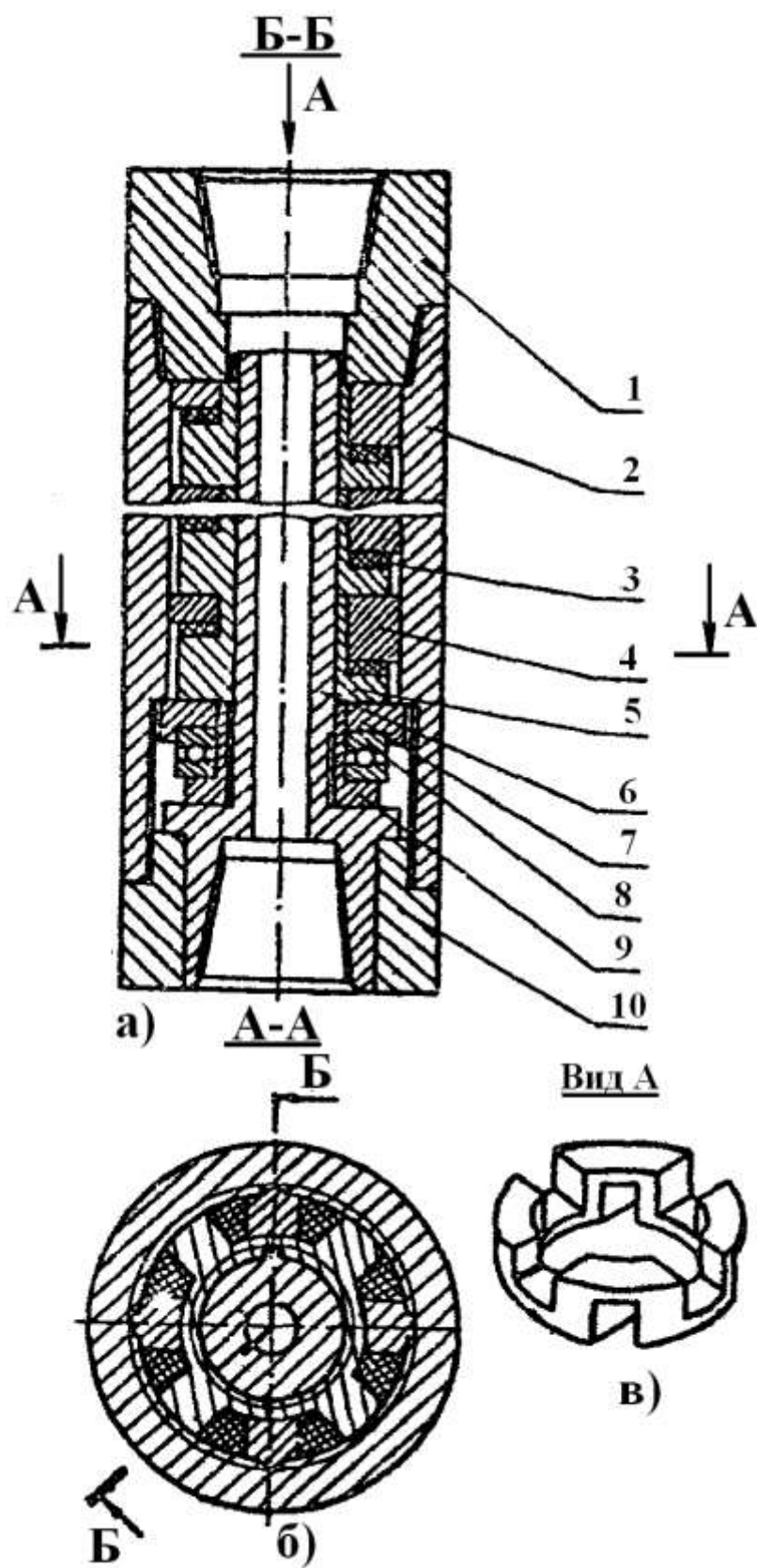


Рисунок 5.2 – Конструкція пружної муфти УМ-180

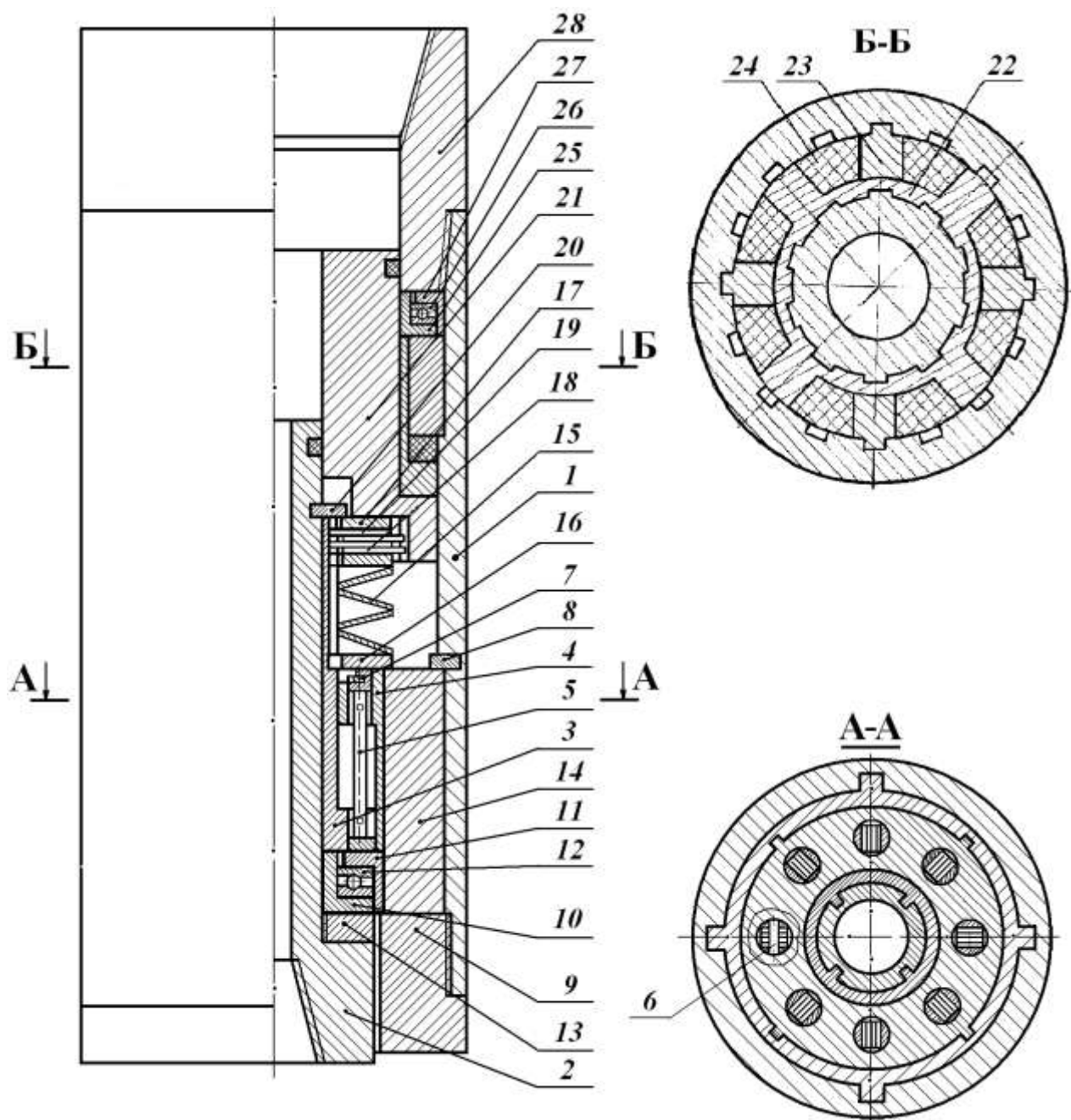


Рисунок 5.3 – Конструкція пропонованого амортизатора крутильних коливань

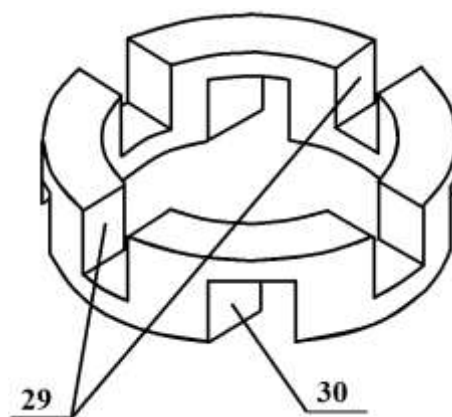


Рисунок 5.4 – Конструкція пружної еластичної втулки, поз.24

Амортизатор працює наступним чином. В процесі буріння крутний момент, до певного значення осьового статичного навантаження, від приводу бурової установки передається від перехідника 28 і корпусу 1, через шліцьове з'єднання між корпусом 1 і втулкою 14, до нижньої секції пружного елемента, яка шліцями з'єднана з нижнім валом 2, до якого кріпиться породоруйнуючий інструмент. Обойми нижньої секції 3 і 4 з'єднані між собою пакетами плоских пружин 5, які під час передачі крутного моменту від корпусу 1 до валу 2, працюють на згин. Кінці пакетів 5 встановлені в отвори внутрішньої шліцьової обойми 3 та прорізи зовнішньої шліцьової обойми 4 і з'єднані з ними за допомогою штифтів 6. Додаткова осьова фіксація одночасно всіх пакетів 5 здійснюється пружинним кільцем 7.

Характеристика нижньої секції, практично, лінійна. Коефіцієнт демпфування секції, який оцінює втрати на внутрішнє тертя між пластинами в пакетах 5, між пакетами 5 та обоймами 3 і 4 близький до нуля, тобто, практично, відсутній.

Осьова фіксація нижньої секції здійснюється розрізним пружинним кільцем 8 та різьбовою гайкою 9. Така осьова фіксація розрахована на певне значення осьового статичного навантаження.

Під час передачі крутного моменту через нижню секцію осьове навантаження сприймається нижнім підшипниковим вузлом амортизатора, який складається з двох центрувальних втулок, внутрішньої 10 і зовнішньої 11, між якими встановлений упорний кульковий підшипник 12. Натяг підшипникового вузла регулюється різьбовою гайкою 13.

За осьового навантаження на долото, більшого за певне значення, розрізне кільце 7 входить у паз корпусу 1 і шліцьова втулка 14, разом з нижньою секцією пружного елемента, переміщається по шліцах корпусу 1, вмикаючи фрикційну муфту 31. Вмикання муфти 31 здійснюється пакетом тарілкових пружин 15, які сприймають це осьове навантаження.

Нижня частина пакету опирається на диск 16, верхня переміщає нижній опорний диск 17, який притискаючи зовнішні фрикційні диски 18 до внутрішніх фрикційних дисків 19. Пружинне кільце 20 фіксує положення фрикційної муфти 31 відносно валу 2. Внутрішні диски 19, які з'єднані із валом 2 шліцьовим з'єднанням,

передають крутний момент від вала 2 до валу 21 верхньої секції пружного елемента амортизатора через зовнішні фрикційні диски 18, які з'єднані з цим валом шліцьовим з'єднанням. Внаслідок цього вмикається верхня секція пружного елемента амортизатора.

Верхня секція пружного елемента амортизатора (переріз Б-Б) розміщена між верхнім валом амортизатора 21 та корпусом 1. Секція складається із внутрішньої обойми 22 та зовнішньої обойми 23. З'єднання обойми 22 із валом 21 та обойми 23 з корпусом 1 – шліцьові. При цьому між обоймами 22 і 23 розміщена пружна еластична втулка 24 (рис. 5.4) із зовнішніми 29 та внутрішніми 30 прорізами, за якими ця втулка з'єднується з обоймами 22 і 23.

Під час передачі крутного моменту від корпуса і до вала 21 втулка 24 знаходиться у складному напруженому стані. Частина втулки, яка знаходиться між боковими поверхнями кулачків обойм 22 і 23, працює на стиск, а ділянки втулки, які розміщені між торцевими поверхнями кулачків обойм 22 і 23, працюють на зсув. Жорсткість втулки 24 незначна, а основним її параметром є коефіцієнт демпфування, який визначає кількість енергії крутильних коливань, генерованих під час процесу буріння шарошковим долотом, яка перетворюється, безповоротно, у теплову внаслідок дії внутрішніх сил тертя еластичної втулки 24.

Під час одночасної роботи нижньої та верхньої секцій пружного елемента характеристика амортизатора із лінійної (характеристика нижньої секції) перетворюється в нелінійну із значним коефіцієнтом демпфування, за яким ця характеристика містить петлю гістерезису. Зовнішнє осьове навантаження на долото, більше за верхню межу певного інтервалу, сприймається двома підшипниковими вузлами, нижнім 12 та верхнім 27.

За зменшення зовнішнього осьового навантаження до заданого певного значення розрізне кільце 8 виходить із пазу корпуса 1. Під час цього фрикційна муфта 31, переміщає нижню секцію у вихідне положення, вимикаючи верхню секцію пружного елемента амортизатора.

На запропоновану конструкцію амортизатора крутильних коливань було подано заявку на винахід (корисну модель), реєстраційний номер 2022 03751. За цією заявкою отримано патент на корисну модель UA №152816 U.

Висновки до розділу 5

1. За результатами аналізу даних буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 із збільшенням частоти обертання механічна швидкість буріння зростає. Задовільні умови підбору частинних емпіричних залежностей $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$ підтверджуються для двох інтервалів заглиблення свердловини. Для інтервалу 33-253 м залежність $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$ підібрана за 4-ма парами значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,95. Для інтервалу 450-600 м, в якому вівся геологічний журнал за результатами відбору шламу, залежність $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$ підібрана за 6-ти парами значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{n}_d$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,998. Точність підбору емпіричної залежності для інтервалу, в якому вівся геологічний журнал, значно вища ніж для інтервалу при відсутності цього журналу.

2. За результатами аналізу даних буріння закінченої свердловини. Ужгородська 104 із збільшенням осьового навантаження на долото механічна швидкість буріння зростає. Задовільні умови підбору частинних емпіричних залежностей $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ підтверджуються для двох інтервалів заглиблення свердловини. Для інтервалу 33-253 м залежність $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ підібрана за 5-ма парами значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,99. Для інтервалу 450-600 м, в якому вівся геологічний журнал за результатами відбору шламу, залежність $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ підібрана за 5-ма парами значень $\bar{V}_{MEX}$ і $\bar{F}_{ДОЛ}$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,98 при незмінних параметрах бурового розчину.

3. Крутний момент на долоті, який враховує енергетичні затрати на процес абразивного стирання породи долотом PDC, без врахування сил тертя між колоною і стінками свердловини наближено рівний крутному моменту ротора для бурової

установки з верхнім приводом, $T_{\partial} \approx T_{OB.P}$. Величина цього моменту із збільшенням частоти обертання зростає. Задовільні умови підбору частинних емпіричних залежностей $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$ підтверджуються для двох інтервалів заглиблення свердловини. Для інтервалу 33-253 м залежність $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$ підібрана за 5-ма парами значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,99. Для інтервалу 450-600 м, в якому вівся геологічний журнал за результатами відбору шламу, залежність $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$ підібрана за 7-ми парами значень $\bar{T}_p$ і $\bar{n}_d$, ймовірність існування цієї залежності більша за 0,99 при незмінних параметрах бурового розчину.

4. За висновками 1-3 застосування методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів процесу буріння в промислових умовах задовільне, оскільки залежності $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n}_d)$, $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{ДОЛ})$, $\bar{T}_p = f(\bar{n}_d)$ і $\bar{T}_p = f(\bar{F}_{ДОЛ})$ одержані при використанні методики, повністю відповідають технологічному процесу буріння глибоких нафтових і газових свердловин.

5. В розділі 4 для оцінки процесу зміни крутного моменту на долоті запропоновано використовувати інтегральний коефіцієнт оцінки динамічності зміни процесу моменту $K_{дин.лн}$, коефіцієнт динамічності $k_{T.д.мах}$ і величину подвійної амплітуди $2A_T$ коливного процесу зміни крутного моменту на долоті. За результатами експериментальних стендових досліджень було одержано залежності $K_{дин.лн.f} = f(n)$ і $K_{дин.лн.f} = f(F_{СТ})$. За цими залежностями із збільшенням значень параметрів режиму буріння величина $K_{дин.лн}$ зростає.

При адаптації цих залежностей до таких же залежностей, одержаних за результатами буріння на буровій Ужгородська 104 з використанням методики, також спостерігається така ж тенденція до збільшення величини $K_{дин.лн}$.

6. Залежності $k_{T.дин.мах.f} = f(n)$ і $k_{T.дин.мах.f} = f(F_{СТ})$, одержані за результатами буріння на буровій Ужгородська 104 з використанням методики, підтверджують такі ж залежності, які одержані за стендовими експериментальними дослідженнями.

7. Залежності $2A_T = f(n)$ і $2A_T = f(F_{CT})$, одержані за результатами буріння на буровій Ужгородська 104 з використанням методики, підтверджують такі ж залежності, які одержані за стендовими експериментальними дослідженнями.

8. За зазначеними вище висновками можна стверджувати, що основні властивості експериментальних залежностей $K_{\text{дин.лн.}f} = f(n)$, $K_{\text{дин.лн.}f} = f(F_{CT})$, $k_{T.\text{дин.мах.}f} = f(n)$, $k_{T.\text{дин.мах.}f} = f(F_{CT})$, $2A_T = f(n)$ і $2A_T = f(F_{CT})$, одержані за стендовими і промисловими дослідженнями однакові, тобто за результатами використання запропонованої методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин можна стверджувати про задовільну адаптацію результатів експериментальних стендових досліджень до промислових даних буріння глибоких нафтових і газових свердловин.

9. Закономірності зміни залежностей $\bar{W}_\Pi$ і $\bar{n}_d$ і $\bar{W}_\Pi = f(\bar{F}_{\text{дол}})$ підтверджують висновок інших дослідників, за яким із збільшенням осьового навантаження енергоємність процесу руйнування гірської породи зменшується а із збільшенням частоти обертання збільшується, тобто використання запропонованої методики аналізу промислових даних задовільне.

10. Ймовірність існування частинних емпіричних залежностей між $\bar{W}_\Pi$ та коефіцієнтами оцінки інтенсивності процесу зміни крутного моменту на долоті і подвійною амплітудою більша за 0,95 і ці залежності описуються гладкими «розумними» кривими. Умови $\sigma_0 < 0,1\bar{K}_{\text{дин.лн}}$, $\sigma_0 < 0,1\bar{k}_{T.\text{д.мах}}$ і $\sigma_0 < 0,1 \cdot 2\bar{A}_T$ підтверджені.

11. За збільшення коефіцієнту $K_{\text{дин.лн}}$ приводить до зменшення енергоємності процесу руйнування гірської породи. За формулою $K_{\text{дин.лн}} = \frac{E_T}{(\bar{T}_\text{д})^2}$ збільшення величини $K_{\text{дин.лн}}$ досягається у випадку зростання загальної енергії процесу зміни крутного моменту або під час зменшення величини крутного моменту. Для випадку коли одночасно зростає величина E_T і $\bar{T}_\text{д}$ збільшення $K_{\text{дин.лн}}$ можливе у випадку більш інтенсивного зростання E_T у порівнянні з ростом $\bar{T}_\text{д}$. Згідно [2] змінюючи

жорсткість КНБК можна досягнути максимальної величини E_T для конкретних умов процесу буріння. Другими словами раціональне використання в КНБК пристроїв зміни її жорсткості зменшує енергоємність процесу руйнування породи і як наслідок зниження енергозатратності будівництва свердловин.

12. Зміну енергоємності при використанні різних режимів буріння і застосування нових методів процесу буріння можна прогнозувати за наявною інформацією їх впливу на процес зміни коефіцієнту $k_{T,\partial.\max}$ і величини $2A_T$, при їх зростанні $\bar{W}_\Pi$ збільшується, при зменшенні – понижується.

13. За результатами аналізу стендових досліджень впливу параметрів бурильного інструменту, жорсткості та коефіцієнту демпфування, на процес зміни крутного моменту на долоті, розділи 3 і 4, запропонована конструкція амортизатора крутильних коливань, яка дозволяє змінювати величину цих параметрів незалежно одно від одного. Новизна такої конструкції підтверджена патентом на корисну модель за номером UA №152816 U.

ВИСНОВКИ

1. Удосконалено методику обробки результатів планового експерименту за рахунок використання антилогарифмів експериментальних даних, які дозволяють підібрати емпіричні частинні залежності з використанням комп'ютерної програми App.1 «Визначення емпіричних рівнянь регресій». Програми захищена свідоцтвом авторського права на твір №115868.

Вперше запропоновано методику обробки результатів зміни технологічних параметрів пробурених свердловин для визначення однорідних ділянок інтервалу поглиблення з використанням розробленої програми App2.

2. Встановлено, що характер зміни емпіричних залежностей $E_T = f(F_{CT})$, $E_{HЧК} = f(F_{CT})$ і $E_{ЗК} = f(F_{CT})$ ідентичний, тобто із збільшенням осьового навантаження енергія процесу руйнування гірської породи під дією обертового моменту зростає.

За залежностями $E_T = f(n)$, $E_{HЧК} = f(n)$ і $E_{ЗК} = f(n)$ встановлено, що із збільшенням частоти обертання долота n енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зменшується.

Аналогічний висновок зроблено на основі аналізу емпіричних залежностей $E_T = f(\beta)$, $E_{HЧК} = f(\beta)$ і $E_{ЗК} = f(\beta)$. Із збільшенням коефіцієнту демпфування енергія процесу руйнування гірської породи під дією крутного моменту зменшується.

Вперше встановлено, що залежності $E_T = f(C)$ і $E_{ЗК} = f(C)$ характеризуються наявністю локальних максимумів, а залежність $E_{HЧК} = f(C)$ не має екстремуму, тобто з'ясовано, що при певних значеннях інтенсифікація процесу руйнування гірської породи відбувається виключно за рахунок зубкових коливань.

Встановлено, що графіки $E_{ЗК} = f(C)$, а значить і $E_T = f(C)$ дозволяють знаходити значення жорсткості C бурильного інструменту при якій енергоємність процесу руйнування гірської породи буде мінімальною. Так, зокрема, для породи твердістю 1440 МПа при зростанні загальної енергії E_T на 18,0% енергоємність W_{II} зменшилась на 12,4%, а для породи твердістю 2050 МПа при зростанні E_T на 16,2%

енергоємність W_{II} зменшилась на 15,4%. Тобто енергоємність W_{II} нища у породах з більшою твердістю.

3. Вперше запропоновано нові критерії оцінки процесу зміни крутного моменту на долоті, а саме інтегральний $K_{дин.ін}$ і максимальний $k_{T.max}$ коефіцієнти динамічності та подвійну амплітуду $2A_T$ коливань крутного моменту на долоті.

Встановлено, що:

- характер зміни емпіричних залежностей $K_{дин.ін} = f(F_{CT})$, $k_{T.max} = f(F_{CT})$, і $2A_T = f(F_{CT})$ ідентичний, тобто зі збільшенням осьового навантаження F_{CT} коефіцієнти та подвійна амплітуда зростають;

- аналогічний висновок зроблено на основі аналізу емпіричних залежностей $K_{дин.ін} = f(n)$, $k_{T.max} = f(n)$ і $2A_T = f(n)$;

- за залежностями $K_{дин.ін} = f(\beta)$, $k_{T.max} = f(\beta)$ і $2A_T = f(\beta)$ встановлено що із збільшенням величини β перелічені показники спадають;

Вперше встановлено, що характер графіків емпіричних залежностей залежностей $K_{дин.ін} = f(C)$, $E_T = f(C)$ і $E_{ЗК} = f(C)$ ідентичний. Він характеризується наявністю кривих локальних максимумів в однаковому інтервалі жорсткості компонування бурильної колони. В цьому ж інтервалі знаходиться і мінімум енергоємності процесу руйнування породи, тобто за залежністю $K_{дин.ін} = f(C)$ можна попередньо визначити жорсткість компонування низу бурильної колони, за якою досягається мінімум енергетичних затрат на процес буріння.

4. Результати перевірки запропонованої методики аналізу зміни технологічних параметрів буріння в промислових умовах задовільне, оскільки залежності $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{n})$, $\bar{V}_{MEX} = f(\bar{F}_{CT})$, $\bar{T}_P = f(\bar{n})$ і $\bar{T}_P = f(\bar{F}_{CT})$ для однорідних ділянок поглиблення свердловини повністю узгоджуються з режимними параметрами проекту буріння.

З'ясовано, що стендові і промислові емпіричні залежності $K_{\text{дин.лн}} = f(F_{\text{СТ}})$, $k_{T.\text{max}} = f(F_{\text{СТ}})$, $2A_T = f(F_{\text{СТ}})$, $K_{\text{дин.лн}} = f(n)$, $k_{T.\text{max}} = f(n)$ і $2A_T = f(n)$ узгоджуються, тобто за результатами використання запропонованої методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння можна стверджувати про задовільну адаптацію результатів експериментальних стендових досліджень до промислових даних буріння.

5. Вперше встановлено емпіричні залежності між енергоємністю $\bar{W}_\Pi$ процесу руйнування гірської породи та подвійною амплітудою $2A_T$, інтегральним $K_{\text{дин.лн}}$ і максимальним $k_{T.\text{max}}$ коефіцієнтами динамічності.

З'ясовано, що із збільшенням $K_{\text{дин.лн}}$ на 17,2% енергоємність W_Π зменшується на 55,5%, а зі збільшенням $k_{T.\text{max}}$ і $2A_T$, відповідно на 47,7% і 42,2%, енергоємність зменшується на 52,2%.

6. Запропоновано конструкцію амортизатора крутильних коливань бурильної колони, яка дозволяє змінювати параметри КНБК, а саме жорсткість C і коефіцієнт демпфування β , незалежно один від одного. Новизна такої конструкції захищена патентом України на корисну модель №152816.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стійкість і коливання бурильної колони / В. М. Мойсишин, Б. Д. Борисевич, Ю. Л. Гаврилів, С. А. Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.
2. Мойсишин В. М. Багатофакторні емпіричні моделі стандартів відносного складника крутного моменту на долоті / В. М. Мойсишин, Р. А. Жовнірук, І. І. Возний // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2021. – №16 (60). – С. 96-114.
3. Демків Т. М. Основи теорії похибок фізичних величин. Методичні вказівки. Львів, ЛНУ, 2008.
4. Якуніна Н. О. Введення в техніку експерименту. Навч. посібник. – Київ: КПІ, 2023.
5. Игнатов В. И. Организация и проведение эксперимента в бурении. – М., 1978.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
7. Балицкий П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. – М.: Недра, 1975. – 293 с.
8. Борисевич Б. Д. Інформаційна модель процесу зміни осьової динамічної сили при бурінні компоновкою різної жорсткості / Б. Д. Борисевич, М. В. Лисканич, Ю. Я. Сітко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2001. Вип. 37 (т. 6). – С. 158-165.
9. Мойсишин В. М. Аналіз результатів стендових досліджень осьової динамічної сили при бурінні тришарошковими долотами / В. М. Мойсишин, О. М. Лисканич, Р. А. Жовнірук, Є. П. Майкович // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2019. – №1(53). – С. 81-93.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Наука, 1974. – 464 с.
11. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
12. Щербій Р. Б. Оцінка впливу жорсткості та демпфування компоновки низу бурового інструменту на середнє значення обертового моменту під час буріння шарошковими долотами / Р. Б. Щербій // Анотації міжнародної науково-технічної

- конференції “Нафтогазова енергетика” – 2011. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 121 с.
13. Буровий стенд для дослідження процесу руйнування гірських порід і динаміки бурильного інструменту / Б. Д. Борисевич, В. М. Мойсишин, Р. Б. Щербій та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2009. – №3(32). – С. 23-29.
14. Поляков В. С. Справочник по муфтам / В. С. Поляков, И. Д. Барабаш, О. А. Ряховский. – М.: Машиностроение, 1974. – 352 с.
15. Упругая муфта УМ-180 / Замиховский Л. М., Борисевич Б. Д., Касек Н. Я. Информационный листок № 88-013 о передовом производственно-техническом опыте. – Ивано-Франковск: МТЦНТИ, 1988. – 4 с.
16. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: 1970. – С. 196-198.
17. Програма «Визначення виду емпіричної залежності методом найменших квадратів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_найменших_квадратів.
18. Методика статистической обработки эмпирических данных. РТМ 44-62, 1966.
19. Протодьяконов М. М. Методика рационального планирования эксперимента. – М., 1970.
20. Яремийчук Р. С., Райхерт Л. А. Бурение стволов большого диаметра. – М.: Недра, 1966. – 174 с.
21. Мойсишин В. М Методика обробки результатів факторного експерименту / В. М. Мойсишин, М. В. Лисканич, Р. А. Жовнірук, В. І. Векерик, Ю. Л. Гаврилів // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2020. – №1(59). – С. 44-65.
22. Мойсишин В. М Удосконалена методика обробки результатів факторного експерименту / В. М. Мойсишин, А. П. Івасютин, В. Р. Процюк, І. І. Возний // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2022. – №17(64). – С. 75-95.
23. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М., 1972.
24. 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.
25. 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.
26. Герасимович А. И., Матвеева Я. И. Математическая статистика. – Мн.: Вышэйш. школа, 1978. – 200 с.
27. Федоров В. С. Научные основы режимов бурения. – М. – Л.: Гостоптехиздат, 1951. – 248 с.
28. Федоров В. С. Проектирование режимов бурения. – Л.: Гостоптехиздат, 1958. – 214 с.
29. Штурман Л. И. Лучше использовать возможности турбинного бурения. Нефтепромысловое дело, вып. 9 и 10, 1953.
30. Булах Г. И. Теория процесса турбинного бурения. Гостоптехиздат, 1958.
31. Фоменко Ф. Н. Об удельном расходе энергии при бурении скважин трехшарошечными долотами. НХ, №3, 1959.
32. Потапов Ю. Ф., Симонов В. В. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра. – М.: Гостоптехиздат, 1961.
33. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
34. Палий П. А., Корнеев К. Е. Буровые долота. – М.: Недра, 1971.
35. Султанов Б. З. Управление устойчивостью и динамикой бурильной колонны. – М.: Недра, 1991. – 208 с.
36. Сароян А. Е. Бурильные колонны в глубоком бурении. – М.: Недра, 1979. – 231 с.
37. Трушкин О. Б. Показатели и параметры работы долот при стендовом бурении // Нефтепромысловое дело. – 2006. – №2. – С. 1-17.
38. Трушкин О. Б. Особенности моментоемкости и энергоемкости долот PDC, оснащенных резцами с фаской // Территория “Нефтегаз”. 2016. – №12. – С. 26-29.
39. Дейли Ф., Деринг У., Пафф Г. Измерение сил, действующих на колонну бурильных труб и ее элементов в процессе бурения // Труды АОИМ: Конструирование и технология машиностроения. – М.: Мир, 1968. – №2. – С. 112-117.

40. Каннингхэм Р. А. Анализ результатов измерений усилий и элементов движения колонны бурильных труб // Труды АОИМ: Конструирование и технология машиностроения. – М.: Мир, 1968. – №2. – С. 14-23.
41. Мавлютов М. Р., Санников Р. Х. Некоторые результаты экспериментального исследования колебаний осевой и моментной нагрузок на шарошечном долоте // Труды УНИ, вып. VIII. – 1972.
42. Некрасов А. М. Исследование особенностей технологии бурения скважин с регулированием динамической нагрузки на долото: Дис. канд. техн. наук. – М., 1975. – 136 с.
43. Горохов Н. А. К вопросу о крутильных колебаниях бурового снаряда при бурении скважин. – М., 1977. – 12с. – Деп. в «Изв. вузов. Геология и разведка», №3821-77.
44. Горохов Н. А. Экспериментальные исследования режимов работы бурильных труб на вертикальном стенде. – М., 1977. – 14с. – Деп. в «Изв. вузов. Геология и разведка», №3671-77.
45. Мойсишин В. М. Статистичний аналіз результатів стендових експериментальних досліджень зміни осевої сили при бурінні долотом Ш 93С / В. М. Мойсишин, О. М. Лисканич, А. І. Масьовський // Прикарпатський вісник наукового товариства ім. Шевченка. Число – 2015. – 1(29). – С. 228-245.
46. Мойсишин В. М. Статистичний аналіз результатів стендових експериментальних досліджень зміни осевого навантаження при бурінні долотами різних типів / В. М. Мойсишин, О. Ю. Витязь, Я. М. Фем'як, А. І. Масьовський, Р. А. Жовнірук // Прикарпатський вісник наукового товариства ім. Шевченка. Число – 2017. – 1(37). – С. 179-194.
47. Борисевич Б. Д. Встановлення основних закономірностей процесу зміни осевої динамічної сили при бурінні тришарошковими долотами різного типу з метою створення діагностичної динамічної моделі процесу буріння // Б. Д. Борисевич, М. В. Лисканич, Р. Л. Піцик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – Вип. 37 (Том 8). – С. 161-163.

48. Torque and Drag Optimization By Using Drilling Simulator: The Effect of Torque and Drag on the Drill String in Vertical and Directional Wells by Using Drilling Simulator Paperback – December 30, 2021 by Mohamed Sobhi Ibrahim Elsayed, Taher El-Fakharany, Samir Khaled.
49. A New Approach to Modelling the Drilling Torque in Conventional and Ultrasonic Assisted Deep-Hole Drilling Processes. Ngoc-Hung Chu, Dang-Binh Nguyen, Nhu-Khoa Ngo, Van-Du Nguyen, Minh-Duc Tran, Ngoc-Pi Vu, Quoc-Huy Ngo and Thi-Hong Tran. Received: 29 October 2018; Accepted: 20 November 2018; Published: 13 December 2018.
50. Chen, D. C-K, 2004, “New Drilling Optimization Technologies Make drilling More Efficient”. Petroleum Society – Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum Paper 2004-020.
51. Dubinsky, V.S.H., Henneuse, H.P. and Kirkmann, M.A. 1992. “Surface Monitoring of Downhole Vibrations: Russian, European and American approaches”. SPE 24969, DOI:10.2118/24969-PA.
52. Aadnoi, B.S, Cooper, I., Miska, S.Z, Mitchell, R.F, Payne, M.L., 2009, “Advanced drilling and Well Technology”, Chapter 6, “Drilling Vibrations” page 544. ISBN 978-1-55563-145-1.
53. Halliburton – Sperry Drilling, ADT Drilling Optimization Brochure, 2018: Drillstring Integrity Service - Vibration Sensors and Vibration Mitigation Guidelines”, page 1-17, H05514 6/10, www.halliburton.com.
54. Prentice C., 1981 “Drilling Problems and Practical Solutions”, Short course manual given by Prentice and Records Enterprises Inc., La.
55. Automated Monitoring of Torque and Drag in Real-time. Master Thesis Philipp Zöllner. Mining University Leoben Department Mineral Resources and Petroleum Engineering Drilling Engineering. 03/2009 Germany.
56. Drillstring Analysis with a Discrete Torque-Drag Model Robert F. Mitchell, SPE, Halliburton, Arve Bjørset and Gaute Grindhaug, Statoil SPE/IADC 163477.
57. Василю Ю.М. До оцінки впливу деяких технологічних параметрів на динамічні процеси в бурильній колоні // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ /

- Державний міжвідомчий науково-технічний збірник. - №38. – Том 2. – Івано-Франківськ, 2001. – с. 32-48.
58. Мислюк М.А., Василюк Ю.М., Рибчич І.Й. До оцінювання динамічних процесів в бурильній колоні. // Нафтова і газова промисловість. – 2000. - №6. – с. 12-25.
59. Мислюк М.А., Зарубін Ю.О. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі. – Івано-Франківськ: Екор, 1999. – с. 492-495.
60. Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин: Довідник: У 5т./ Т/2.: Промивання свердловин. Відробка доліт. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2002. – с. 303.
61. Мойсишин В.М. Основи механіки бурильної колони при поглибленні свердловини роторним способом: Автореферат дис. д.т.н. – Ів.-Фр., 1996. – 48 с.
62. Мочернюк Д.Ю. Дослідження взаємозв'язку між жорсткістю колони бурильних труб і механічною швидкістю буріння свердловин. // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №1. – С. 12-20.
63. Нежильський А.Б. Вплив компоновки бурильної колони на показники буріння // Нафтова і газова промисловість. – 1993. – №2. – С. 20-22.
64. Щербій Р.Б. Підвищення ефективності роботи шарошкових доліт на основі експериментальних досліджень процесу буріння: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – ІФНТУНТ. – Івано-Франківськ. – 2014, с. 155.
65. Про інтенсифікацію динамічних режимів роботи шарошкових доліт. / М.А. Мислюк, Ю.М. Василюк, І.Й. Рибчич, Р.І. Стефурак // Матеріали 6-ої міжнародної науково-практ. конф. «Нафта і газ України - 2000», Івано-Франківськ. – 2000. – С.
66. Рибчич І.Й., Мислюк М.А., Василюк Ю.М. Аналіз показників відробки тришарошкових доліт. // Нафтова і газова промисловість. – 1999. - №3. – с. 20.
67. Харченко Е.В. Динамические процессы буровых установок. – Львов: Свит, 1997. – с. 167-172.
68. Юнин Е.К. Низкочастотные колебания бурильного инструмента. – М.:Недра, 1983. – с.112.
69. Василюк Ю.М. Вплив динамічних процесів в бурильній колоні на роботу тришарошкових доліт: Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – ІФНТУНТ. – Івано-Франківськ. – 2002, с. 78,83,95.

Додаток А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, В. Р. Процюк, І. І. Возний. Удосконалена методика обробки результатів факторного експерименту // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2022. – №17(64). – С. 75-95. DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-75-95.
2. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, Л. В. Борисевич, О. М. Витвицька. Багатофакторні емпіричні моделі енергії низькочастотних та зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті // Металофізика та новітні технології. – 2023. №10(45). С. 1205-1235. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.10.1205>.
3. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**. Експериментальна оцінка енергії зубцевих коливань динамічного складника обертового моменту на долоті // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2024. – № 19(73). С. – 105-125. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19\(73\)-105-125](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2024-19(73)-105-125).
4. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**, В.В. Тирлич. Методика обробки результатів зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2025. – № 20(76). С. – 114-137. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20\(76\)-114-137](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-20(76)-114-137).
5. В. М. Мойсишин, **А. П. Івасютин**. Експериментальна оцінка подвійної амплітуди коливного процесу зміни обертового моменту на долоті // Прикарпатський вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Число. – 2025. – 21(79). С. 179-206. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-21\(79\)-179-206](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2025-21(79)-179-206).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Удосконалена методика апроксимації даних планового експерименту частинними емпіричними залежностями / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Modern problems of science,

education and society», 26-28.03.2023 р. – Київ: Науково-видавничий центр “Sci-conf.com.ua”, 2023. – С. 352-358. ISBN 978-966-8219-87-0.

2. Стендові експериментальні дослідження динамічного складника обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Scientific progress: innovations, achievements and prospects.», 1-3.05.2023. – Munich, Germany. 2023. – С. 145-151. ISBN 978-3-954753-04-8.
3. Вплив параметрів режиму буріння і компоновання низу бурильної колони на інтенсивність процесу зміни обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Science and education: synergy of innovation», 26-28.01.2026. – Берлін, Німеччина. 2026.
4. Стендові експериментальні дослідження подвійної амплітуди динамічного складника обертового моменту на долоті / В.М. Мойсишин, **А.П. Івасютин** // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Innovation and development in world science», 2-4.02.2026. – Цюрих, Швейцарія. 2026.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №115868. Комп'ютерна програма «Визначення емпіричних рівнянь регресії» (програма «App.1») / **А. П. Івасютин**, В. М. Мойсишин. Дата реєстрації 17.01.2023. Свідоцтво №115868 від 17.01.2023 року. Електронний ідентифікатор CR0043170123 <https://sis.ukrpatent.org>.
2. Патент на корисну модель № 152816 Україна, МПК E21B 17/02 (2006.01). Амортизатор крутильних коливань / В. М. Мойсишин, Б. Д. Борисевич, **А. П. Івасютин**. – № u 2022 03751; заявл. 07.10.2022; опубл. 12.04.2023, Бюл. № 15.

Додаток Б

Приклад застосування методики обробки результатів факторного експерименту, проведеного за греко-латинським квадратом 4x4.

Таблиця 1 – Приклад заповненого комбінаційного квадрата за результатами планованого експерименту, розробленого на основі греко-латинського квадрата 4x4

B		B1=10				B2=15				B3=20				B4=25			
A	D	D1 400	D2 800	D3 1700	D4 2500	D1 400	D2 800	D3 1700	D4 2500	D1 400	D2 800	D3 1700	D4 2500	D1 400	D2 800	D3 1700	D4 2500
	C																
A1=82	C1 0,1	Y1 0,7439															
	C2 40								Y2 0,9755								
	C3 70										Y3 2,1132						
	C4 90															Y4 2,6751	
A2=133	C1 0,1																Y8 5,895
	C2 40									Y7 5,9675							
	C3 70							Y6 5,4009									
	C4 90		Y5 3,3686														
A3=188	C1 0,1						Y10 18,6954										
	C2 40			Y9 14,7959													
	C3 70													Y12 19,5022			
	C4 90												Y11 20,6856				

Продовження табл. 1

B		B1=10				B2=15				B3=20				B4=25			
A	D	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
	C	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500
A4=285	C1 0,1											Y15 39,6878					
	C2 40														Y16 58,4906		
	C3 70				Y13 27,5384												
	C4 90					Y14 25,1398											

Таблиця 2 – Матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4x4

№досл.	A	B	C	D	Y
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132
4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856
12		B4 25	C3 70	D1 400	Y12 19,5022
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906

Таблиця 3 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів A і B

$B \backslash A$	$A1=82$	$A2=133$	$A3=188$	$A4=285$	Сума	Середнє
$B1$ 10	$Y1$ 0,7439	$Y5$ 3,3686	$Y9$ 14,7959	$Y13$ 27,5384	$\sum_{j=1}^4 Y_{B1..j} = 46,4468$	$\bar{Y}_{B1}$ 11,6117
$B2$ 15	$Y2$ 0,9755	$Y6$ 5,4009	$Y10$ 18,6954	$Y14$ 25,1398	$\sum_{j=1}^4 Y_{B2..j} = 50,2116$	$\bar{Y}_{B2}$ 12,5529
$B3$ 20	$Y3$ 2,1132	$Y7$ 5,9675	$Y11$ 20,6856	$Y15$ 39,6878	$\sum_{j=1}^4 Y_{B3..j} = 68,4541$	$\bar{Y}_{B3}$ 17,1135
$B4$ 25	$Y4$ 2,6751	$Y8$ 5,895	$Y12$ 19,5022	$Y16$ 58,4906	$\sum_{j=1}^4 Y_{B4..j} = 86,5629$	$\bar{Y}_{B4}$ 21,6407
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{A1..j}$ 6,5077	$\sum_{j=1}^4 Y_{A2..j}$ 20,632	$\sum_{j=1}^4 Y_{A3..j}$ 73,6791	$\sum_{j=1}^4 Y_{A4..j}$ 150,8566	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A..j} = \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{B..j}$ 251,6754	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{B..j}$ 62,91885
Середнє	$\bar{Y}_{A1}$ 1,6269	$\bar{Y}_{A2}$ 5,158	$\bar{Y}_{A3}$ 18,4198	$\bar{Y}_{A4}$ 37,7142	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{A..j} = 62,91885$	

Таблиця 4 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів C і D

$C \backslash D$	$D1=400$	$D2=800$	$D3=1700$	$D4=2500$	Сума	Середнє
$C1$ 0,1	$Y1$ 0,7439	$Y10$ 18,6954	$Y15$ 39,6878	$Y8$ 5,895	$\sum_{j=1}^4 Y_{C1..j} = 65,0221$	$\bar{Y}_{C1}$ 16,2555
$C2$ 40	$Y7$ 5,9675	$Y16$ 58,4906	$Y9$ 14,7959	$Y2$ 0,9755	$\sum_{j=1}^4 Y_{C2..j} = 80,2295$	$\bar{Y}_{C2}$ 20,0574
$C3$ 70	$Y12$ 19,5022	$Y3$ 2,1132	$Y6$ 5,4009	$Y13$ 27,5384	$\sum_{j=1}^4 Y_{C3..j} = 54,5547$	$\bar{Y}_{C3}$ 13,6387
$C4$ 90	$Y14$ 25,1398	$Y5$ 3,3686	$Y4$ 2,6751	$Y11$ 20,6856	$\sum_{j=1}^4 Y_{C4..j} = 51,8691$	$\bar{Y}_{C4}$ 12,9673
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{D1..j}$ 51,3534	$\sum_{j=1}^4 Y_{D2..j}$ 82,6678	$\sum_{j=1}^4 Y_{D3..j}$ 62,5597	$\sum_{j=1}^4 Y_{D4..j}$ 55,0945	$\sum_{C=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{C..j} = \sum_{D=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{D..j}$ 251,6754	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{C..j}$ 62,91885
Середнє	$\bar{Y}_{D1}$ 12,8384	$\bar{Y}_{D2}$ 20,6670	$\bar{Y}_{D3}$ 15,6399	$\bar{Y}_{D4}$ 13,7736	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{D..j}$ 62,91885	

Позначення у табл.3: j – номер рівня незалежного фактора, $j=1...4$: $\sum_{j=1}^4 Y_{A1..j}$ – сума значень

функції Y для першого рівня фактора A , одержаних для чотирьох рівнів фактора B ; $\bar{Y}_{A1} = \frac{\sum_{j=1}^4 Y_{A1..j}}{4}$ –

середнє значення функції Y для першого рівня фактора A ;

$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A..j} = \sum_{j=1}^4 Y_{A1..j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A2..j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A3..j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A4..j}$ – сумарне значення функції Y за всіма рівнями фактора A .

За даними табл. 3 і 4, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей $\bar{Y}_{A..f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B..f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C..f} = f(C)$, $\bar{Y}_{D..f} = f(D)$.

У табл.5 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{D.f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального.

Таблиця 5 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,9777 0,95<P<0,98	1,555<1,573	23,14
	$\bar{Y}_{A.j}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142			
	$\bar{Y}_{A.f.j} = \left(-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j}\right)^2$							
B	B_j	10	15	20	25	0,9821 0,98<P<0,99	0,063<1,57	1,86
	$\bar{Y}_{B.j}$	11,6117	12,5529	17,1135	21,6407			
	$\bar{Y}_{B.f.j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$							
C	C_j	0,1	40	70	90	0,6175 0,6<P<0,7	2,67>1,57	1,55
	$\bar{Y}_{C.j}$	16,2555	20,0574	13,6387	12,9673			
	$\bar{Y}_{C.j} = 18,1783098 \cdot C_j^{0,99681}$					0,46 0,3<P<0,4	1,64>1,57	
	$\bar{Y}_{C.f.j} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C_j - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C_j^2$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,6423 0,5<P<0,6	2,68>1,57	1,61
	$\bar{Y}_{D.j}$	12,8384	20,6670	15,6399	13,7736			
	$\bar{Y}_{D.f.j} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D_j - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{A.f} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A})^2$

A_j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A.f.j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
Екс.значення $\bar{Y}_{A.j}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142
$\bar{Y}_{\bar{A}} = (\bar{Y}_{A1} + \bar{Y}_{A2} + \bar{Y}_{A3} + \bar{Y}_{A4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{A.f.j} - \bar{Y}_{A.j})^2$	0,21187609	4,09536169	2,94740224	0,00660969

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{A.f.j} - \bar{Y}_{A.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7,25464}{4-1}} = 1,555 < 1,57.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{A.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{A.j} - \bar{Y}_{\bar{A}})^2 / n} = \sqrt{\frac{(1,6269 - 15,7297)^2 + (5,158 - 15,7297)^2 + (18,4198 - 15,7297)^2 + (37,7142 - 15,7297)^2}{4}} = 14,1528.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності $\bar{Y}_{A.f}$

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{A.f.j} - \bar{Y}_{\bar{A}})^2 / n} = \sqrt{\left[(1,1666 - 15,7297)^2 + (7,1817 - 15,7297)^2 + \right. \\ \left. + (16,703 - 15,7297)^2 + (37,6329 - 15,7297)^2 \right] / 4} = 13,834.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 13,834 / 14,1528 = 0,9777,$$

$$T_{\text{СП}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9777 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9777^2}} = 6,58 > T_{\text{КР}} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Довірча ймовірність існування кореляційного зв'язку між величинами A і Y знаходиться в інтервалі $0,95 < P < 0,98$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{C.f} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C^2$

C_j	0,1	40	70	90
$\bar{Y}_{C.f.j}$ за формулою	16,6164	18,5583	15,7962	11,9607
Екс.значення $\bar{Y}_{C.j}$	16,2555	20,0574	13,6387	12,9673
$\bar{Y}_{\bar{C}} = (\bar{Y}_{C1} + \bar{Y}_{C2} + \bar{Y}_{C3} + \bar{Y}_{C4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{C.f.j} - \bar{Y}_{C.j})^2$	0,13024881	2,24730081	4,65480625	1,01324356

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{C.f.i} - \bar{Y}_{C.E.i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{8,0456}{4-1}} = 1,637 \approx 1,64.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{C.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{C.j} - \bar{Y}_{\bar{C}})^2 / n} = \sqrt{\left[(16,2555 - 15,7297)^2 + (20,0574 - 15,7297)^2 + \right. \\ \left. + (13,6387 - 15,7297)^2 + (12,9673 - 15,7297)^2 \right] / 4} = 7,7521.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності $\bar{Y}_{C.f.j}$

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{C.f.j} - \bar{Y}_{\bar{C}})^2 / n} = \sqrt{\left[(16,6164 - 15,7297)^2 + (18,5583 - 15,7297)^2 + \right. \\ \left. + (15,7962 - 15,7297)^2 + (11,9607 - 15,7297)^2 \right] / 4} = 2,3978.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,3978 / 7,7521 = 0,3093, \quad T_{\text{СП}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,3093 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,3093^2}} = 0,46 > T_{\text{КР}} = 0,44 \rightarrow P = 0,3.$$

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{D.f} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{D.f.j}$ за формулою	14,7814	17,2001	17,9068	13,0307
Екс.значення $\bar{Y}_{D.j}$	12,8384	20,6670	15,6399	13,7736
$\bar{Y}_{\bar{D}} = (\bar{Y}_{D1} + \bar{Y}_{D2} + \bar{Y}_{D3} + \bar{Y}_{D4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{D.f.j} - \bar{Y}_{D.j})^2$	3,775249	12,01939561	5,13883561	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{D.f.j} - \bar{Y}_{D.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48538}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{D,j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{D,j} - \bar{Y}_{\bar{D}})^2 / n} = \sqrt{\left[\frac{(12,8384 - 15,7297)^2 + (20,667 - 15,7297)^2 + (15,6399 - 15,7297)^2 + (13,7736 - 15,7297)^2}{4} \right]} = 3,0237.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y,f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y,f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{D,f,j} - \bar{Y}_{\bar{D}})^2 / n} = \sqrt{\left[\frac{(14,7814 - 15,7297)^2 + (17,2001 - 15,7297)^2 + (17,9068 - 15,7297)^2 + (13,0307 - 15,7297)^2}{4} \right]} = 1,9420.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y,f}}{\sigma_y} = 1,942 / 3,0237 = 0,6423,$$

$$T_{\text{СП}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6423 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6423^2}} = 1,185 > T_{\text{КР}} = 1,061 \rightarrow P = 0,5.$$

За табл.5 умови задовільної апроксимації виконуються тільки для двох залежностей $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$, і $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$. З врахуванням цього переходимо до другого етапу методики створення багатофакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції.

Другий етап. Послідовна нейтралізація впливу зовнішніх чинників величину Y за методом Протодьяконова.

З усіх факторів A, B, C і D впливу на процес зміни величини Y фактор A , за відношенням $\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}$ найпотужніший. При його нейтралізації визначається середнє значення:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^4 A_j}{4} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4 = (82 + 133 + 188 + 285) / 4 = 172, \text{ і за цим значенням і залежністю}$$

$$\bar{Y}_{A,f} = f(A_j) \text{ обчислюється значення функції } \bar{Y}_{A,f} = (-4,768 + 0,6458123 \sqrt{172})^2 = 13,7029.$$

Скореговані вхідні дані визначаються за формулою $Y_{\text{СК.1.}i} = Y_i + (\bar{Y}_{A,f} - \bar{Y}_{A,f,j}), i = 1 \dots 16, j = 1 \dots 4.$

Результати обчислення за цією формулою зведено в таблицю

A_j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A,f,j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
$\bar{Y}_{A,f} - \bar{Y}_{A,f,j}$	13,7029-1,1666= =12,5363	13,7029-7,1817= =6,5212	13,7029-16,703= =-3,0001	13,7029-37,6329= =-23,93

Для дослідів 1-4 скореговані значення рівні $Y_{\text{СК.1.}(1..4)} = Y_{E.(1..4)} + 12,5363. i = 1 \dots 4; j = 1.$ Для дослідів 5-8 скореговані значення рівні $Y_{\text{СК.1.}(5..8)} = Y_{E.(5..8)} + 6,5212. i = 5 \dots 8; j = 2.$ Для дослідів 9-12 скореговані значення рівні $Y_{\text{СК.1.}(9..12)} = Y_{E.(9..12)} - 3,0001. i = 9 \dots 12; j = 3.$ Для дослідів 13-16 скореговані значення рівні $Y_{\text{СК.1.}(13..16)} = Y_{E.(13..16)} - 23,93. i = 13 \dots 16; j = 4.$

Таблиця 6 – Скореговані експериментальні значення $Y_{\text{СК.1.}i}$, одержані за методом Протодьяконова

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i + (\bar{Y}_{A,f} - \bar{Y}_{A,f,j})$	$Y_{\text{СК.1.}i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439	0,7439+12,5363	13,2802
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755	0,9755+12,5363	13,5118
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132	2,1132+12,5363	14,6495

Продовження табл. 6

4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751	2,6751+12,5363	15,2114
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686	3,3686+6,5212	9,8898
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009	5,4009+6,5212	11,9221
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675	5,9675+6,5212	12,4887
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895	5,895+6,5212	12,4162
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959	14,7959-3,0001	11,7958
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954	18,6954-3,0001	15,6953
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856	20,6856-3,0001	17,6855
12		B4 25	C3 70	D1 400	Y12 19,5022	19,5022-3,0001	16,5021
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384	27,5384-23,93	3,6084
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398	25,1398-23,93	1,2084
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878	39,6878-23,93	15,7578
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906	58,4906-23,93	34,5606

Таблиця 7 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.1.i}$ за значеннями параметрів A і B

$B \backslash A$	$A1=82$	$A2=133$	$A3=188$	$A4=285$	Сума	Середнє
$B1$	13,2802	9,8898	11,7958	3,6084	38,5742	9,6436
$B2$	13,5118	11,9221	15,6953	1,2084	42,3376	10,5844
$B3$	14,6495	12,4887	17,6855	15,7578	60,5815	15,1454
$B4$	15,2114	12,4162	16,5021	34,5606	78,6903	19,6726
Сума	56,6529	46,7168	61,6787	55,1352	220,1836	55,046
Середнє	14,1632	11,6792	15,4197	13,7838	55,0459	

Таблиця 8 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.1.i}$ за значеннями параметрів C і D

$C \backslash D$	$D1=400$	$D2=800$	$D3=1700$	$D4=2500$	Сума	Середнє
$C1$	13,2802	15,6953	15,7578	12,4162	57,1495	14,2874
$C2$	12,4887	34,5606	11,7958	13,5118	72,3569	18,0892
$C3$	16,5021	14,6495	11,9221	3,6084	46,6821	11,6705
$C4$	1,2084	9,8898	15,2114	17,6855	43,9951	10,9988
Сума	43,4794	74,7952	54,6871	47,2219	220,1836	
Середнє	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055		

За даними табл.7 і 8, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей $\bar{Y}_{CK.1.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{CK.1.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{CK.1.C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{CK.1.D.f} = f(D)$.

У табл.9 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{CK.1.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{CK.1.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{CK.1.C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{CK.1.D.f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального.

Таблиця 9. – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}_{Ck.1}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,16	1,53>1,38	1,32
	$\bar{Y}_{CK.1.A.j}$	14,1632	11,6792	15,4197	13,7838	0,1<P<0,2		
	$\bar{Y}_{CK.1.A.f.j} = 11,4426 + 0,0355 \ln A_j$					Вплив A нейтралізовано		
B	B_i	10	15	20	25	0,9691	0,54<1,38	2,04
	$\bar{Y}_{CK.1.B.j}$	9,6436	10,5844	15,1454	19,6726	0,95<P<0,98		
	$\bar{Y}_{CK.1..B.f.j} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B_j^3$							
C	C_i	0,1	40	70	90	0,59	2,06>1,38	1,64
	$\bar{Y}_{CK.1.C.j}$	14,2874	18,0892	11,6705	10,9988	0,5<P<0,6		
	$\bar{Y}_{CK.1..C.j} = 14,703 - 7,424781 \cdot 10^{-6} \cdot C_j^3$							
D	D_i	400	800	1700	2500	0,6402	2,68>1,38	1,72
	$\bar{Y}_{CK.1.D.j}$	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055	0,5<P<0,6		
	$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} = 9,09847912 + 0,0109042 \cdot D_j - 4,04747 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.1.D.f} = 9,0984897 + 0,0109046 \cdot D - 4,04758 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j}$ за формулою	12,8127	15,2317	15,9388	11,0626
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.1.D.j}$	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.1}} = (\bar{Y}_{D1CK.1} + \bar{Y}_{D2CK.1} + \bar{Y}_{D3CK.1} + \bar{Y}_{D4CK.1}) / 4 = 55,04595 / 4 = 13,7615$				
$(\bar{Y}_{CK.1.D.f.j} - \bar{Y}_{CK.1.D.j})^2$	3,77486041	12,02078241	5,139289	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.1.D.f.i} - \bar{Y}_{CK.1.D.i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48683}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.1.D.i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.1}} - \bar{Y}_{CK.1.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(10,8698 - 13,7615)^2 + (18,6988 - 13,7615)^2 + (13,6718 - 13,7615)^2 + (11,8055 - 13,7615)^2}{4}} = 3,0238.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} - \bar{Y}_{\bar{D}_{CK.1}})^2 / n} = \sqrt{\frac{(12,8127 - 13,7615)^2 + (15,2317 - 13,7615)^2 + (15,9388 - 13,7615)^2 + (11,0626 - 13,7615)^2}{4}} = 1,9421.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,9421 / 3,0238 = 0,6423,$$

$$T_{CP} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6423 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6423^2}} = 1,185 > T_{KP} = 1,061 \rightarrow P = 0,5.$$

Наступним фактором, який потрібно нейтралізувати, – фактор B . Умови апроксимації першого варіанту скорегованих даних залежністю $\bar{Y}_{CK.1..B.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B^3$ підтверджені, для факторів C і D ці умови не підтверджені. Середнє значення фактора $\bar{B} = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4 = (10 + 15 + 20 + 25) / 4 = 17,5$. За цим значенням і формулою $\bar{Y}_{CK.1.\bar{B}.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot 17,5^3 = 12,5937$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.1..B.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B^3$

B_j	10	15	20	25
$\bar{Y}_{CK.1.B.f.j}$ за формулою	9,4924	11,1820	14,4722	19,8967
$\bar{Y}_{CK.1.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.1.B.f.j}$	12,5937-9,4924= =3,1013	12,5937-11,1820= =1,4117	12,5937-14,4722= =-1,8785	12,5937-19,8967= =-7,303

Другий варіант скорегованих вхідних даних визначаються за формулою $Y_{CK.2.i} = Y_{CK.1.i} + (\bar{Y}_{CK.1.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.1.B.f.j})$, $i = 1-16$, $j = 1-4$. Для дослідів 1, 5, 9 і 13 скореговані значення рівні $Y_{CK.2.(1,5,9,13)} = Y_{CK.1.(1,5,9,13)} + 3,1013$, $i = 1,5,9,13$; $j = 1$. Для дослідів 2, 6, 10 і 14 скореговані значення рівні $Y_{CK.1.(2,6,10,14)} = Y_{CK.1.(2,6,10,14)} + 1,4117$, $i = 1,6,10,14$; $j = 2$. Для дослідів 3, 7, 11 і 15 скореговані значення рівні $Y_{CK.1.(3,7,11,15)} = Y_{CK.1.(3,7,11,15)} - 1,8785$, $i = 3,7,11,15$; $j = 3$. Для дослідів 4, 8, 12 і 16 скореговані значення рівні $Y_{CK.1.(4,8,12,16)} = Y_{CK.1.(4,8,12,16)} - 7,303$; $i = 4,8,12,16$; $j = 4$.

Таблиця 10 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.2.i}$, одержані за методом Протодяконова

№досл.	A	B	C	D	$Y_{CK.1.i}$	$Y_{CK.1.i} + (\bar{Y}_{CK.1.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.1.B.f.j})$	$Y_{CK.2.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	13,2802	13,2802+3,1013	16,3815
2		B2 15	C2 40	D4 2500	13,5118	13,5118+1,4117	14,9235
3		B3 20	C3 70	D2 800	14,6495	14,6495-1,8785	12,771
4		B4 25	C4 90	D3 1700	15,2114	15,2114-7,303	7,9084
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	9,8898	9,8898+3,1013	12,9911
6		B2 15	C3 70	D3 1700	11,9221	11,9221+1,4117	13,3338
7		B3 20	C2 40	D1 400	12,4887	12,4887-1,8785	10,6102
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	12,4162	12,4162-7,303	5,1132
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	11,7958	11,7958+3,1013	14,8971
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	15,6953	15,6953+1,4117	17,107
11		B3 20	C4 90	D4 2500	17,6855	17,6855-1,8785	15,807
12		B4 25	C3 70	D1 400	16,5021	16,5021-7,303	9,1991
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	3,6084	3,6084+3,1013	6,7097
14		B2 15	C4 90	D1 400	1,2084	1,2084+1,4117	2,6201
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	15,7578	15,7578-1,8785	13,8793
16		B4 25	C2 40	D2 800	34,5606	34,5606-7,303	27,2576

Таблиця 11 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.2.i}$ за значеннями параметрів A і B

BA	$A1=82$	$A2=133$	$A3=188$	$A4=285$	Сума	Середнє
$B1$	16,3815	12,9911	14,8971	6,7097	50,9794	12,7448
$B2$	14,9235	13,3338	17,107	2,6201	47,9844	11,9961
$B3$	12,771	10,6102	15,807	13,8793	53,0675	13,2669
$B4$	7,9084	5,1132	9,1991	27,2576	49,4783	12,3696
Сума	51,9844	42,0483	57,0102	50,4667	201,5096	
Середнє	12,9961	10,5121	14,2526	12,6167		

Таблиця 12 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.2.i}$ за значеннями параметрів C і D

CD	$D1=400$	$D2=800$	$D3=1700$	$D4=2500$	Сума	Середнє
$C1$	16,3815	17,107	13,8793	5,1132	52,481	13,1202
$C2$	10,6102	27,2576	14,8971	14,9235	67,5884	16,8971
$C3$	9,1991	12,771	13,3338	6,7097	42,0136	10,5034
$C4$	2,6201	12,9911	7,9084	15,807	39,3266	9,8316
Сума	38,8109	70,1267	50,0186	42,5534	201,5096	
Середнє	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384		

Таблиця 13 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації другого варіанту скорегованих вхідних даних

Задля визначення впливу факторів на результати експерименту використовували наступні дані									
Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{S}_{CK.2}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$	
A	A_j	82	133	188	285	0,16	1,53>1,26	1,36	
	$\bar{Y}_{CK.2.A.j}$	12,9961	10,5121	14,2526	12,6167	0,1<P<0,2			
	$\bar{Y}_{CK.2.A.f.j} = 10,2030 + 0,473867 \ln A_i$					Вплив A нейтралізовано			
B	B_j	10	15	20	25	0,03	0,54<1,26	1,11	
	$\bar{Y}_{CK.2.B.j}$	12,7448	11,9961	13,2669	12,3696	0<P<0,1			
	$\bar{Y}_{CK.2..B.f.j} = 0,0028 \cdot B_i + 12,54353$					Вплив B нейтралізовано			
C	C_j	0,1	40	70	90	0,59	2,6>1,26	1,72	
	$\bar{Y}_{CK.2.C.j}$	13,1202	16,8971	10,5034	9,8316	0,5<P<0,6			
	$\bar{Y}_{CK.2.C.j} = -0,0482 \cdot C_i + 15,00317$								
D	D_j	400	800	1700	2500	0,6422	2,68>1,26	1,81	
	$\bar{Y}_{CK.2.D.j}$	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384	0,6<P<0,7			
	$\bar{Y}_{3K.2.D.f.j} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D_j - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$								
	$\bar{Y}_{CK.2...D.f.j} = -0,00085 \cdot D_j + 13,7410$					0,23 0,2<P<0,3			3,4>1,26

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.2.D.f} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{3K.2.D.f.j}$ за формулою	11,6458	14,0646	14,7715	9,8954
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.2.D.j}$	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}} = (\bar{Y}_{D1_{CK.2}} + \bar{Y}_{D2_{CK.2}} + \bar{Y}_{D3_{CK.2}} + \bar{Y}_{D4_{CK.2}}) / 4 = 50,3774 / 4 = 12,5944$				
$(\bar{Y}_{CK.2.D.f.j} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2$	3,77486041	12,02078241	5,139289	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.2.D.f.j} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48683}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.2.D.i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(9,7027 - 12,5944)^2 + (17,5317 - 12,5944)^2 + (12,5046 - 12,5944)^2 + (10,6384 - 12,5944)^2}{4}} = 3,0238.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}} - \bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}})^2 / n} = \sqrt{\frac{(11,6458 - 12,5944)^2 + (14,0646 - 12,5944)^2 + (14,7715 - 12,5944)^2 + (9,8954 - 12,5944)^2}{4}} = 1,9420.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,9421 / 3,0238 = 0,6422.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6422 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6422^2}} = 1,185 > T_{KP} = 1,061 \rightarrow P = 0,6.$$

Підбір залежностей $\bar{Y}_{CK.2.C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{CK.2.D.f} = f(D)$, які б задовільно апроксимували вхідні дані, незадовільний. В цьому випадку переходимо до третього етапу методики.

Третій етап. Послідовна нейтралізація впливу зовнішніх чинників на величину Y за методом Яремійчука-Райхерта.

З усіх факторів A, B, C і D впливу на процес зміни величини Y фактор A , за відношенням $\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$ найпотужніший. При його нейтралізації визначається середнє значення:

$$\bar{A} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4 = (82 + 133 + 188 + 285) / 4 = 172.$$

За значенням $\bar{A}$ і залежністю $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$ обчислюється значення функції:

$$\bar{Y}_{A.f} = (-4,768 + 0,6458123 \sqrt{172})^2 = 13,7029.$$

Скореговані вхідні дані визначаються за формулою

$$Y_{CK.3.i} = Y_i \frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}} \quad i = 1 \dots 16, \quad j = 1 \dots 4.$$

Результати обчислення за цією формулою зведено в таблицю

A_j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A.f.j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
$\frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}}$	$13,7029 / 1,1666 = 11,7460$	$13,7029 / 7,1817 = 1,9080$	$13,7029 / 16,703 = 0,8204$	$13,7029 / 37,6329 = 0,3641$

Для дослідів 1 - 4 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(1..4)} = Y_{E.(1..4)} \cdot 11,7029. i = 1 \dots 4; j = 1.$

Для дослідів 5 - 8 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(5..8)} = Y_{E.(5..8)} \cdot 1,908. i = 5 \dots 8; j = 2.$

Для дослідів 9 - 12 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(9..12)} = Y_{E.(9..12)} \cdot 0,8204. i = 9 \dots 12; j = 3.$

Для дослідів 13 - 16 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(13..16)} = Y_{E.(13..16)} \cdot 0,3641. i = 13 \dots 16; j = 4.$

Таблиця 14 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.3.i}$, одержані за методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i \frac{\bar{Y}_{A..f}}{\bar{Y}_{A.f..j}}$	$Y_{CK.3.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439	0,7439·11,7460	8,7378
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755	0,9755·11,7460	11,4582
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132	2,1132·11,7460	24,8216
4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751	2,6751·11,7460	31,4217
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686	3,3686·1,9080	6,4273
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009	5,4009·1,9080	10,3049
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675	5,9675·1,9080	11,3860
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895	5,895·1,9080	11,2477
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959	14,7959·0,8204	12,1386
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954	18,6954·0,8204	15,3377
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856	20,6856·0,8204	16,9705
12		B4 25	C3 70	D1 400	Y12 19,5022	19,5022·0,8204	15,9996
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384	27,5384·0,3641	10,0267
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398	25,1398·0,3641	9,1534
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878	39,6878·0,3641	14,4503
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906	58,4906·0,3641	21,2964

Таблиця 15 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.3.i}$ за значеннями параметрів A і B

B\A	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1	8,7378	6,4273	12,1386	10,0267	37,3304	9,3326
B2	11,4582	10,3049	15,3377	9,1534	46,2542	11,5636
B3	24,8216	11,3860	16,9705	14,4503	67,6284	16,9071
B4	31,4217	11,2477	15,9996	21,2964	79,9654	19,9914
Сума	76,4393	39,3659	60,4464	54,9268	231,1784	
Середнє	19,1098	9,8415	15,1116	13,7317		

Таблиця 16 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.3.i}$ за значеннями параметрів C і D

CD	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	8,7378	15,3377	14,4503	11,2477	49,7735	12,4434
C2	11,3860	21,2964	12,1386	11,4582	56,2792	14,0698
C3	15,9996	24,8216	10,3049	10,0267	61,1528	15,2882
C4	9,1534	6,4273	31,4217	16,9705	63,9729	15,9932
Сума	45,2768	67,883	68,3155	49,7031	231,1784	
Середнє	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258		

Таблиця 17 –Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації скорегованих даних $Y_{CK.3.i}$

Залежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_{\bar{S}_{CK.3}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,42 $0,4 < P < 0,5$	3,46 > 1,44	1,94
	$\bar{Y}_{CK.3.A.j}$	19,1098	9,8415	15,1116	13,7317			
	$\bar{Y}_{CK.3.A.f.j} = 29,9513 - 3,072 \ln A_i$					Вплив A нейтралізовано		
B	B_j	10	15	20	25	0,9885 $0,98 < P < 0,99$	0,74 < 1,44	2,14
	$\bar{Y}_{CK.3.B.j}$	9,3326	11,5636	16,9071	19,9914			
	$\bar{Y}_{CK.3..B.f.j} = 0,746398 \cdot B_i + 1,38671$							
C	C_j	0,1	40	70	90	0,9997 $0,999 < P < 1,0$	0,04 < 1,44	1,28
	$\bar{Y}_{CK.3.C.j}$	12,4434	14,0698	15,2882	15,9932			
	$\bar{Y}_{CK.3..C.j} = 0,03974 \cdot C_i + 12,46048$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,9525 $P \approx 0,95$	0,92 < 1,44	1,51
	$\bar{Y}_{CK.3.D.j}$	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258			
	$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D_j - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.3.D.f} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$, за програмою

"NUMERI": $\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} = 14,4487$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.3.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.3.D.j} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2 = 2,5208904.$$

D	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.3.D.f.j}$ за формулою	11,9848	15,7833	17,8554	12,1713
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.3.D.j}$	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} = (\bar{Y}_{D1_{CK.3}} + \bar{Y}_{D2_{CK.3}} + \bar{Y}_{D3_{CK.3}} + \bar{Y}_{D4_{CK.3}}) / 4 = 57,7947 / 4 = 14,4487$				
$(\bar{Y}_{CK.3.D.j} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2$	0,4430	1,41015625	0,60295225	0,06477025

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.3.D.i} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2,52090211}{4-1}} = 0,917 \approx 0,92.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.3.D.i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} - \bar{Y}_{CK.3.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(14,4487 - 11,3192)^2 + (14,4487 - 16,9708)^2 + (14,4487 - 17,0789)^2 + (14,4487 - 12,4258)^2}{4}} = 2,6060.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(14,4487 - 11,9848)^2 + (14,4487 - 15,7833)^2 + (14,4487 - 17,8554)^2 + (14,4487 - 12,1713)^2}{4}} = 2,4821.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,4821 / 2,606 = 0,9525,$$

$$T_{\text{сп}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9525 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9525^2}} = 4,424 \approx T_{\text{кр}} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Наступним, за відношенням $\frac{Y_{\text{max}}}{Y_{\text{min}}} = 2,4$, є фактор B . Середнє значення фактора $\bar{B} = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4 = (10 + 15 + 20 + 25) / 4 = 17,5$. За цим значенням і формулою $\bar{Y}_{\text{CK.3.}\bar{B}.f} = 0,746398 \cdot 17,5 + 1,38671 = 14,4487$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{\text{CK.3.}B.f} = 0,746398 \cdot B + 1,38671$

B	10	15	20	25
$\bar{Y}_{\text{CK.3.}B.f}$ за формулою	8,8507	12,5827	16,3147	20,0467
$\bar{Y}_{\text{CK.3.}\bar{B}.f} / \bar{Y}_{\text{CK.3.}B.f}$	$14,4487/8,8507 = 1,6325$	$14,4487/12,5827 = 1,1483$	$14,4487/16,3147 = 0,8856$	$14,4487/20,0467 = 0,7208$

Скореговані вхідні дані, одержані при нейтралізації фактора B , визначаються за формулою

$$Y_{\text{CK.4.}i} = Y_{\text{CK.3.}i} \cdot \frac{\bar{Y}_{\text{CK.3.}\bar{B}.f}}{\bar{Y}_{\text{CK.3.}B.f}}, i = 1 \dots 16, j = 1 \dots 4.$$

Для дослідів 1, 5, 9 і 13 скореговані значення рівні $Y_{\text{CK.4.}(1,5,9,13)} = Y_{\text{CK.3.}(1,5,9,13)} \cdot 1,6325$, $i = 1, 5, 9, 13; j = 1$. Для дослідів 2, 6, 10 і 14 скореговані значення рівні $Y_{\text{CK.4.}(2,6,10,14)} = Y_{\text{CK.3.}(2,6,10,14)} \cdot 1,1483$, $i = 2, 6, 10, 14; j = 2$. Для дослідів 3, 7, 11 і 15 скореговані значення рівні $Y_{\text{CK.4.}(3,7,11,15)} = Y_{\text{CK.3.}(3,7,11,15)} \cdot 0,8856$, $i = 3, 7, 11, 15; j = 3$.

Для дослідів 4, 8, 12 і 16 скореговані значення рівні $Y_{\text{CK.4.}(4,8,12,16)} = Y_{\text{CK.3.}(4,8,12,16)} \cdot 0,7208$, $i = 4, 8, 12, 16; j = 4$.

В табл.18 наведений четвертий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{\text{CK.4.}i}$, одержаних при нейтралізації фактора B методом Яремійчука-Райхерта.

Таблиця 18 – Четвертий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{\text{CK.4.}i}$, одержаних при нейтралізації фактора B методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	$Y_{\text{CK.3.}i}$	$Y_{\text{CK.3.}i} \cdot \frac{\bar{Y}_{\text{CK.3.}\bar{B}.f}}{\bar{Y}_{\text{CK.3.}B.f}}$	$Y_{\text{CK.4.}i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	8,7378	$8,7378 \cdot 1,6325$	14,2644
2		B2 15	C2 40	D4 2500	11,4582	$11,4582 \cdot 1,1483$	13,1574
3		B3 20	C3 70	D2 800	24,8216	$24,8216 \cdot 0,8856$	21,9820
4		B4 25	C4 90	D3 1700	31,4217	$31,4217 \cdot 0,7208$	22,6488
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	6,4273	$6,4273 \cdot 1,6325$	10,4926
6		B2 15	C3 70	D3 1700	10,3049	$10,3049 \cdot 1,1483$	11,8331
7		B3 20	C2 40	D1 400	11,3860	$11,3860 \cdot 0,8856$	10,0834
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	11,2477	$11,2477 \cdot 0,7208$	8,1073
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	12,1386	$12,1386 \cdot 1,6325$	19,8163
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	15,3377	$15,3377 \cdot 1,1483$	17,6123
11		B3 20	C4 90	D4 2500	16,9705	$16,9705 \cdot 0,8856$	15,0291

Продовження табл. 18

12		B4 25	C3 70	D1 400	15,9996	15,9996·0,7208	11,5325
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	10,0267	10,0267·1,6325	16,3686
14		B2 15	C4 90	D1 400	9,1534	9,1534·1,1483	10,5108
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	14,4503	14,4503·0,8856	12,7972
16		B4 25	C2 40	D2 800	21,2964	21,2964·0,7208	15,3504

Таблиця 19 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.4i}$ за значеннями параметрів A і B

$B \backslash A$	$A1=82$	$A2=133$	$A3=188$	$A4=285$	Сума	Середнє
$B1$	14,2644	10,4926	19,8163	16,3686	60,9419	15,2355
$B2$	13,1574	11,8331	17,6123	10,5108	53,1136	13,2784
$B3$	21,9820	10,0834	15,0291	12,7972	59,8917	14,9729
$B4$	22,6488	8,1073	11,5325	15,3504	57,639	14,410
Сума	72,0526	40,5164	63,9902	55,027	231,5862	
Середнє	18,0132	10,1291	15,9976	13,7567		

Таблиця 20 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.4i}$ за значеннями параметрів C і D

$C \backslash D$	$D1=400$	$D2=800$	$D3=1700$	$D4=2500$	Сума	Середнє
$C1$	14,2644	17,6123	12,7972	8,1073	52,7812	13,1953
$C2$	10,0834	15,3504	19,8163	13,1574	58,4075	14,6019
$C3$	11,5325	21,9820	11,8331	16,3686	61,7162	15,4290
$C4$	10,5108	10,4926	22,6488	15,0291	58,6813	14,6703
Сума	46,3911	65,4373	67,0954	52,6624	231,5862	
Середнє	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656		

Таблиця 21 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_{\bar{S}_{CK.4}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,32 0,3<P<0,4	3,2>1,44	1,78
	$\bar{Y}_{CK.4.A.j}$	18,0132	10,1291	15,9976	13,7567			
	$\bar{Y}_{CK.4.A.f.j} = 24,9119 - 2,0683 \ln A_j$					Вплив А нейтралізовано		
B	B_j	10	15	20	25	0,18 0,1<P<0,2	0,85<1,44	1,15
	$\bar{Y}_{CK.4.B.j}$	15,2355	13,2784	14,9729	14,41			
	$\bar{Y}_{CK.4.B.f.j} = 15,6003 \cdot B_j^{-0,02719}$					Вплив В нейтралізовано		
C	C_j	0,1	40	70	90	0,9311 0,9<P<0,95	0,36<1,44	1,17
	$\bar{Y}_{CK.4.C.j}$	13,1953	14,6019	15,429	14,6703			
	$\bar{Y}_{CK.4.C.j} = 13,77805 \cdot C_j^{0,01882}$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,9554 0,95<P<0,98	0,74<1,44	1,45
	$\bar{Y}_{CK.4.D.j}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656			
	$\bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.A.D.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$, за програмою "NUMERI": $\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.A}} = 14,4741$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.A.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.A.D.j} - \bar{Y}_{CK.A.D.f.j})^2 = 1,6418679.$$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.A.D.f.j}$ за формулою	12,1349	15,4009	17,4005	12,9603
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.A.D.j}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.A}} = (\bar{Y}_{D1_{CK.A}} + \bar{Y}_{D2_{CK.A}} + \bar{Y}_{D3_{CK.A}} + \bar{Y}_{D4_{CK.A}}) / 4 = 57,8965 / 4 = 14,4741$				
$(\bar{Y}_{CK.A.D.j} - \bar{Y}_{CK.A.D.f.j})^2$	0,28847641	0,91853056	0,39275289	0,04214809

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.A.D.j} - \bar{Y}_{CK.A.D.f.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,64190795}{4-1}} = 0,74.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.A.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.A}} - \bar{Y}_{CK.A.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(14,4741 - 11,5978)^2 + (14,4741 - 16,3593)^2 + (14,4741 - 16,7738)^2 + (14,4741 - 13,1656)^2}{4}} = 2,1696.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.A.D} - \bar{Y}_{CK.A.D.f.i})^2 / n} = \sqrt{\frac{(14,4742 - 12,1349)^2 + (15,4009 - 14,4742)^2 + (17,4005 - 14,4742)^2 + (12,9603 - 14,4742)^2}{4}} = 2,0728.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,0728 / 2,1696 = 0,9554,$$

$$T_{CP} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9554 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9554^2}} = 4,57 > T_{KP} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Наступним для нейтралізації, за відношенням $\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}} = 1,45$, є фактор D . Середнє значення

фактора $\bar{D} = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) / 4 = (400 + 800 + 1700 + 2500) / 4 = 1350$. За цим значенням і формулою

$$\bar{Y}_{3K.A.\bar{D}.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot 1350 - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot 1350^2 = 17,5030.$$

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.A.D.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_s	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.A.D.f.j}$ за формулою	12,1349	15,4009	17,4005	12,9603
$\bar{Y}_{CK.A.\bar{D}.f} / \bar{Y}_{CK.A.D.f.j}$	17,503/12,1349= =1,4424	17,503/15,4009= =1,1365	17,503/17,4005= =1,0059	17,503/12,9603= =1,3505

Скореговані вхідні дані, одержані при нейтралізації фактора D , визначаються за формулою

$$Y_{CK.5.i} = Y_{CK.4.i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.A.\bar{D}.f}}{\bar{Y}_{CK.A.D.f.j}}, i = 1-16, j = 1-4.$$

Для дослідів 1, 7, 12 і 14 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(1,7,12,14)} = Y_{CK.4.(1,7,12,14)} \cdot 1,4424$, $i = 1,7,12,14; j = 1$. Для дослідів 3, 5, 10 і 16 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(3,5,10,16)} = Y_{CK.4.(3,5,10,16)} \cdot 1,1365$, $i = 3,5,10,16; j = 2$. Для дослідів 4, 6, 9 і 15 скореговані значення

рівні $Y_{CK.5.(4,6,9,15)} = Y_{CK.4.(4,6,9,15)} \cdot 1,0059, i = 4, 6, 9, 15; j = 3$. Для дослідів 2, 8, 11 і 13 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(2,8,11,16)} = Y_{CK.4.(4,8,12,16)} \cdot 1,3505, i = 2, 8, 11, 13 j = 4$.

В табл.18 наведений п'ятий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.5.i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта.

Таблиця 22 – П'ятий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.4.i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	$Y_{CK.3.i}$	$Y_{CK.4.i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.4.D.f}}{\bar{Y}_{CK.4.D.f.j}}$	$Y_{CK.5.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	14,2644	$14,2644 \cdot 1,4424$	20,575
2		B2 15	C2 40	D4 2500	13,1574	$13,1574 \cdot 1,3505$	17,7691
3		B3 20	C3 70	D2 800	21,9820	$21,9820 \cdot 1,1365$	24,9825
4		B4 25	C4 90	D3 1700	22,6488	$22,6488 \cdot 1,0059$	22,7824
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	10,4926	$10,4926 \cdot 1,1365$	11,9248
6		B2 15	C3 70	D3 1700	11,8331	$11,8331 \cdot 1,0059$	11,9029
7		B3 20	C2 40	D1 400	10,0834	$10,0834 \cdot 1,4424$	14,5443
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	8,1073	$8,1073 \cdot 1,3505$	10,9489
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	19,8163	$19,8163 \cdot 1,0059$	19,9332
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	17,6123	$17,6123 \cdot 1,1365$	20,0163
11		B3 20	C4 90	D4 2500	15,0291	$15,0291 \cdot 1,3505$	20,2968
12		B4 25	C3 70	D1 400	11,5325	$11,5325 \cdot 1,4424$	16,6345
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	16,3686	$16,3686 \cdot 1,3505$	22,1058
14		B2 15	C4 90	D1 400	10,5108	$10,5108 \cdot 1,4424$	15,1608
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	12,7972	$12,7972 \cdot 1,0059$	12,8727
16		B4 25	C2 40	D2 800	15,3504	$15,3504 \cdot 1,1365$	17,4457

Таблиця 23 – Результати п'ятого варіанту корегованих вхідних даних експерименту, усереднені за значеннями параметрів C і D

CD	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	20,575	20,0163	12,8727	10,9489	64,4129	16,1032
C2	14,5443	17,4457	19,9332	17,7691	69,6923	17,4231
C3	16,6345	24,9825	11,9029	22,1058	75,6257	18,9064
C4	15,1608	11,9248	22,7824	20,2968	70,1648	17,5412
Сума	66,9146	74,3693	67,4912	71,1206	279,8957	
Середнє	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802		

Таблиця 24 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_i$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
C	C_j	0,1	40	70	90	0,8378	0,65<1,75	1,17
	$\bar{Y}_{CK.5.C.j}$	16,1032	17,4231	18,9064	17,5412	0,8<P<0,9		
	$\bar{Y}_{CK.5.C.j} = 16,7312 \cdot C_j^{0,01695}$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,1224	0,86<1,75	1,11
	$\bar{Y}_{CK.5.D.j}$	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802	0<P<0,1		
	$\bar{Y}_{3K.5.D.f.j} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D_j - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D_j^2$							
	$\bar{Y}_{CK.5..D.j} = 16,09846 \cdot D_j^{0,01177}$					0,19 0,1<P<0,2	0,65<1,75	

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.5.D.f} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D^2$, за програмою

"NUMERI": $\bar{Y}_{CK.5.D} = 17,4935$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.4.5.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2 = 2,2260158.$$

D	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.5.D.f.j}$ за формулою	17,3540	17,4763	17,6024	17,5410
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802
$(\bar{Y}_{CK.5.D.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2$	0,39112516	1,245456	0,53231616	0,05721664

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2,22611396}{4-1}} = 0,86.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.5.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(17,4935 - 16,7286)^2 + (17,4935 - 18,5923)^2 + (17,4935 - 16,8728)^2 + (17,4935 - 17,7802)^2}{4}} = 0,7516.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(17,4935 - 17,354)^2 + (17,4935 - 17,4763)^2 + (17,4935 - 17,6024)^2 + (17,4935 - 17,541)^2}{4}} = 0,0920.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 0,092 / 0,7516 = 0,1224.$$

$$T_{\text{сп}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,1224 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,1224^2}} = 0,17 > T_{\text{кр}} = 0 \rightarrow P = 0.$$

За наведеним вище матеріалом за експериментальними $Y_{E.i}$ і скорегованими $Y_{CK.1...} Y_{CK.5}$ вхідними даними для кожного зовнішнього незалежного чинника підібрана емпірична залежність,

яка задовільно апроксимує вхідні дані, тобто можна переходити до останнього етапу методики – створення багатфакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції.

При підготовці прикладу використання запропонованої методики наведено також і варіант четвертого етапу, який використовується у випадку незадовільного підбору задовільної апроксимуючої залежності хоча б для одного з чотирьох незалежних зовнішніх чинників при використанні перших трьох етапів.

Четвертий етап. Підбір емпіричних частинних залежностей за прологарифмованими вхідними даних експерименту, табл.2.3

В табл. 25 наведено результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.6i}$ за параметрами A і B .

Таблиця 25 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.6i}$ за значеннями параметрів A і B

BA		$A1=82$	$A2=133$	$A3=188$	$A4=285$	Сума	Середнє	Анти $\log$
$B1$		0,7439	3,3686	14,7959	27,5384			
	lg	-0,1285	0,5274	1,1701	1,4399	3,0089	0,7523	5,6528
$B2$		0,9755	5,4009	18,6954	25,1398			
	lg	-0,0108	0,7325	1,2717	1,4004	3,3938	0,8484	7,0542
$B3$		2,1132	5,9675	20,6856	39,6878			
	lg	0,3249	0,7758	1,3157	1,5986	4,0150	1,0038	10,0867
$B4$		2,6751	5,895	19,5022	58,4906			
	lg	0,4273	0,7705	1,2901	1,7671	4,2550	1,0637	11,5809
Сума		0,6129	2,8062	5,0476	6,206	14,6727		
Середнє		0,1532	0,7016	1,2619	1,5515		3,6682	
Анти lg		1,4231	5,0298	18,2768	35,6041			

Таблиця 26 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.6i}$ за значеннями параметрів A і B

CD		$D1=400$	$D2=800$	$D3=1700$	$D4=2500$	Сума	Середнє	Анти $\log$
$C1$		0,7439	18,6954	39,6878	5,895			
	lg	-0,1285	1,2717	1,5986	0,7705	3,5123	0,8781	7,5526
$C2$		5,9675	58,4906	14,7959	0,9755			
	lg	0,7758	1,7671	1,1701	-0,0108	3,7022	0,9256	8,4248
$C3$		19,5022	2,1132	5,4009	27,5384			
	lg	1,2901	0,3249	0,7325	1,4399	3,7874	0,9468	8,8482
$C4$		25,1398	3,3686	2,6751	20,6856			
	lg	1,4004	0,5274	0,4273	1,3157	3,6708	0,9177	8,2737
Сума		3,3378	3,8911	3,9285	3,5153	14,6727		
Середнє		0,8344	0,9728	0,9821	0,8788			
Анти $\log$		6,8305	9,3924	9,5968	7,5653			

За даними табл.25 і 26, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей $\bar{Y}_{CK.6.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{CK.6.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{CK.6.C.f} = f(C)$, $\bar{Y}_{CK.6.D.f} = f(D)$.

У табл.27 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{CK.6.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{CK.6.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{CK.6.C.f} = f(C)$, $\bar{Y}_{CK.6.D.f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями прологарифмованих експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального.

Таблиця 27 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації прологарифмованих експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_{\bar{s}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,9891 0,98<P<0,99	2,27>1,52	25,02
	$\bar{Y}_{CK.6.A.j}$	1,4231	5,0298	18,2762	35,6041			
	$\bar{Y}_{CK.6.A.f.j} = 0,1762 \cdot A_j - 15,2323$							
B	B_j	10	15	20	25	0,9886 0,98<P<0,99	0,41<0,85	2,05
	$\bar{Y}_{CK.6.B.j}$	5,6528	7,0542	10,0867	11,5809			
	$\bar{Y}_{CK.6.B.f.j} = 0,4163 \cdot B_j + 1,30777$							
C	C_j	0,1	40	70	90	0,8965 0,8<P<0,9	0,25<0,83	1,17
	$\bar{Y}_{CK.6.C.j}$	7,5526	8,4248	8,8482	8,2737			
	$\bar{Y}_{CK.6.C.j} = 7,88705 \cdot C_j^{0,0183}$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,9574 0,95<P<0,98	0,39<0,83	1,40
	$\bar{Y}_{CK.6.D.j}$	6,8305	9,3924	9,5968	7,5653			
	$\bar{Y}_{CK.6.D.f.j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.6.D.f.j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$ за програмою

"NUMERI": $\bar{Y}_{CK.6.D} = 8,346$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.6.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.i})^2 = 0,4639001.$$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.6.D.f.j}$ за формулою	7,1160	8,8829	9,9298	7,4560
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.5.D.i}$	6,8305	9,3924	9,5968	7,5653
$(\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2$	0,08151025	0,25959025	0,110889	0,01194649

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,46393599}{4-1}} = 0,393.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.6.D} - \bar{Y}_{CK.6.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(6,8305 - 8,346)^2 + (9,3924 - 8,346)^2 + (9,5968 - 8,346)^2 + (7,5653 - 8,346)^2}{4}} = 1,1796. \text{ Міжгрупове}$$

середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.6.D} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(7,1160 - 8,346)^2 + (8,8829 - 8,346)^2 + (9,9298 - 8,346)^2 + (7,456 - 8,346)^2}{4}} = 1,1293.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,1293 / 1,1796 = 0,9574,$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9574 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9574^2}} = 4,69 > T_{KP} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

П'ятий етап. Встановлення за емпіричними частинними залежностями $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C,f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{D,f} = f(D)$ багатфакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції виду $Y = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$.

В табл. 28-31 наведено всі варіанти підбору емпіричних залежностей за експериментальними, прологарифмованими і скорегованими, за методами Протодьяконова і Яремичука-Райхерта, даними для всіх зовнішніх факторів планованого експерименту. Найкращим варіантом підбору вважається залежність, за якою довірна ймовірність кореляційного зв'язку між залежною змінною величиною Y і незалежним зовнішнім чинником більша за 0,95. Якщо таких залежностей декілька то приймається залежність з найбільшою величиною $\frac{0,1\bar{Y}_A}{\sigma_0}$.

Прологарифмовані вхідні дані використовуються тільки в тому випадку, коли за експериментальними і скорегованими даними хоча б для одного фактора не підібрана залежність, для якої результати апроксимації негативні.

Таблиця 28 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_A$	$\frac{0,1\bar{Y}_A}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.2	$\bar{Y}_{A,f,j} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j})^2$	0,9777 0,95 < P < 0,98	1,56 < 1,57	1,01
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1.A.f,j} = 11,4426 + 0,0355 \ln A_j$	0,16 0,1 < P < 0,2	1,53 > 1,38	0,9
		Вплив A нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 2.П) A і $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2.A.f,j} = 10,2030 + 0,47387 \ln A_j$	0,16 0,1 < P < 0,2	1,53 > 1,26	0,8
		Вплив A і B нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3.A.f,j} = 29,9513 - 3,072 \ln A_j$	0,42 0,4 < P < 0,5	3,46 > 1,44	0,42
		Вплив A нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 4.Я) A і $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4.A.f,j} = 24,9119 - 2,0683 \ln A_j$	0,32 0,3 < P < 0,4	3,2 > 1,44	0,45
		Вплив A і B нейтралізовано		
Прологарифмовані дані, табл.25	$\bar{Y}_{CK.6.A.f,j} = 0,1762 \cdot A_j - 15,2323$	0,9891 0,98 < P < 0,99	2,27 > 1,52	0,67

Краща залежність за табл.28 - $\bar{Y}_{A,f,j} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j})^2$

Таблиця 29 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_B$	$\frac{0,1\bar{Y}_B}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.3	$\bar{Y}_{B,f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$	0,9821 0,98<P<0,99	0,063<1,57	24,9
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1..B,f,j} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B_j^3$	0,9691 0,95<P<0,98	0,54<1,38	2,56
Скореговані дані (Ск. 2.П) $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2..B,f,j} = 0,0028 \cdot B_j + 12,54353$	0,03 0<P<0,1	0,54<1,26	2,33
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3..B,f,j} = 0,746398 \cdot B_j + 1,38671$	0,9885 0,98<P<0,99	0,74<1,44	1,94
Скореговані дані (Ск. 4.Я) A і $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4..B,f,j} = 15,6003 \cdot B_j^{-0,02719}$	0,18 0,1<P<0,2	0,85<1,44	1,69
Прологарифмовані дані, табл.25	$\bar{Y}_{CK.6.B,f,j} = 0,4163 \cdot B_j + 1,30777$	0,9886 0,98<P<0,99	0,41<0,85	2,07

Краща залежність за табл.29 - $\bar{Y}_{B,f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$ Таблиця 30 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{C,f} = f(C)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_C$	$\frac{0,1\bar{Y}_C}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.3	$\bar{Y}_{C,f,j} = 18,1783098 \cdot C_j^{0,99681}$	0,6175 0,6<P<0,7	2,67>1,57	0,59
	$\bar{Y}_{C,f,j} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C_j - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C_j^2$	0,46 0,3<P<0,4	1,64>1,57	0,96
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1..C,j} = 14,703 - 7,424781 \cdot 10^{-6} \cdot C_j^3$	0,59 0,5<P<0,6	2,06>1,38	0,67
Скореговані дані (Ск. 2.П) $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2.C,j} = -0,0482 \cdot C_j + 15,00317$	0,59 0,5<P<0,6	2,6>1,26	0,48
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3..C,j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$	0,9997 0,999<P<1,0	0,04<1,44	36
Скореговані дані (Ск. 4.Я) A і $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4..C,j} = 13,77805 \cdot C_j^{0,01882}$	0,9311 0,9<P<0,95	0,36<1,44	4
Скореговані дані (Ск. 5.Я) A, B і $i \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.5..C,j} = 16,7312 \cdot C_j^{0,01695}$	0,8378 0,8<P<0,9	0,65<1,75	2,69
Прологарифмовані дані, табл.26	$\bar{Y}_{CK.6.C,j} = 7,88705 \cdot C_j^{0,0183}$	0,8965 0,8<P<0,9	0,25<0,83	3,32

Краща залежність за табл.30 - $\bar{Y}_{CK.3.C.j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$

Таблиця 31 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{D.f} = f(D)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_D$	$\frac{0,1\bar{Y}_D}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.4	$\bar{Y}_{D.f.j} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D_j - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6423 $0,5 < P < 0,6$	2,68 > 1,57	0,58
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} = 9,09847912 + 0,0109042 \cdot D_j - 4,04747 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6402 $0,5 < P < 0,6$	2,68 > 1,38	0,51
Скореговані дані (Ск. 2.П) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.2.D.f.j} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D_j - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6422 $0,6 < P < 0,7$	2,68 > 1,26	0,47
		Вплив A і B нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D_j - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9525 $P \approx 0,95$	0,92 < 1,44	1,56
		Вплив A нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 4.Я) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9554 $0,95 < P < 0,98$	0,74 < 1,44	1,95
		Вплив A і B нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 5.Я) $A, B \text{ і } D \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.5.D.f.j} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D_j - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D_j^2$	0,1224 $0 < P < 0,1$	0,86 < 1,75	2,03
		Вплив A, B і D нейтралізовано		
Прологарифмовані дані, табл.26	$\bar{Y}_{CK.6.D.f.j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9574 $0,95 < P < 0,98$	0,39 < 0,83	2,13

Краща залежність за експериментальними і скорегованими даними $\bar{Y}_{3K.4.D.j} - \bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$.

Таблиця 32 – Усереднені експериментальні та скореговані значення функції Y і значення, визначені за кращими емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей

$$\bar{Y}_{A.f} = f(A), \bar{Y}_{B.f} = f(B), \bar{Y}_{C.f} = f(C) \text{ і } \bar{Y}_{D.f} = f(D).$$

A_j	82	133	188	285
Експериментальні значення $Y_{A.i}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142
$\bar{Y}_{A.f.j} = (-4,768 + 0,6458123 \cdot \sqrt{A_j})^2$	<u>1,1666</u>	<u>7,1817</u>	<u>16,7030</u>	<u>37,6329</u>
B_j	10	15	20	25
Експериментальні значення $Y_{B.i}$	11,6117	12,5529	17,1135	21,6407
$\bar{Y}_{B.f.j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$	<u>11,2675</u>	<u>13,3950</u>	<u>16,5130</u>	<u>21,5229</u>
C_j	0,1	40	70	90
Скореговані значення $Y_{CK.3.i}$	12,4434	14,0698	15,2882	15,9932
$\bar{Y}_{CK.3.C.j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$	<u>12,4644</u>	<u>14,0501</u>	<u>15,2423</u>	<u>16,0371</u>
D_j	400	800	1700	2500
Скореговані значення $Y_{CK.4.i}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656
$\bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	<u>12,1349</u>	<u>15,4009</u>	<u>17,4005</u>	<u>12,9603</u>

Багатофакторна модель у вигляді добутку буде мати вигляд

$$Y = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D) = \bar{B} \cdot \left(-4,768 + 0,6458123 \sqrt{A_j} \right)^2 x(1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943) x(0,03974 \cdot C_j + 12,46048) x(7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2).$$

У формулі моделі $\bar{B}$ – середнє значення постійної складової B_i , де $i=1 - 16$ – порядковий номер дослідів експерименту, $j=1 - 4$ – порядковий номер рівня незалежного фактору.

У табл.33 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою

$$B_i = \frac{Y_{E.i}}{f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)},$$

де $Y_{E.i}$ – експериментальні значення функції за даними табл. 1, яка відповідає i -тому дослідів;
 $f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослідів, табл. 32.

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{Y_{E.1}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_1 = 400)} = \\ &= \frac{0,7439}{1,1666 \cdot 11,2675 \cdot 12,4644 \cdot 12,1349} = \frac{0,7439}{1988,18649} = 3,7416 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{Y_{E.2}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_4 = 2500)} = \\ &= \frac{0,9755}{1,1666 \cdot 13,395 \cdot 14,0501 \cdot 12,9603} = \frac{0,9755}{2845,503734} = 3,42821 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_3 &= \frac{Y_{E.3}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_2 = 800)} = \\ &= \frac{2,1132}{1,1666 \cdot 16,513 \cdot 15,2423 \cdot 15,4009} = \frac{2,1132}{4522,145786} = 4,673 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_4 &= \frac{Y_{E.4}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_3 = 1700)} = \\ &= \frac{2,6751}{1,1666 \cdot 21,5229 \cdot 16,0371 \cdot 17,4005} = \frac{2,6751}{7006,648405} = 3,81794 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_5 &= \frac{Y_{E.5}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_2 = 800)} = \\ &= \frac{3,3686}{7,1817 \cdot 11,2675 \cdot 16,0371 \cdot 15,4009} = \frac{3,3686}{19986,04056} = 1,68547 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_6 &= \frac{Y_{E.6}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_3 = 1700)} = \\ &= \frac{5,4009}{7,1817 \cdot 13,395 \cdot 15,2423 \cdot 17,4005} = \frac{5,4009}{25514,21497} = 2,1168 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_7 &= \frac{Y_{E.7}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_1 = 400)} = \\ &= \frac{5,9675}{7,1817 \cdot 16,5130 \cdot 14,0501 \cdot 12,1349} = \frac{5,9675}{20219,42763} = 2,95136 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

$$B_8 = \frac{Y_{E.8}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_4 = 2500)} =$$

$$= \frac{5,895}{7,1817 \cdot 21,5229 \cdot 12,4644 \cdot 12,9603} = \frac{5,895}{24969,76641} = 2,36085 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_9 = \frac{Y_{E.9}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_3 = 1700)} =$$

$$= \frac{14,7959}{16,703 \cdot 11,2675 \cdot 14,0501 \cdot 17,4005} = \frac{14,7959}{46011,1609} = 3,21571 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{10} = \frac{Y_{E.10}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_2 = 800)} =$$

$$= \frac{18,6954}{16,703 \cdot 13,395 \cdot 12,4644 \cdot 15,4009} = \frac{18,6954}{42949,16033} = 4,35291 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{11} = \frac{Y_{E.11}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_4 = 2500)} =$$

$$= \frac{20,6856}{16,703 \cdot 16,513 \cdot 16,0371 \cdot 12,9603} = \frac{20,6856}{57327,28231} = 3,60833 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{12} = \frac{Y_{E.12}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_1 = 400)} =$$

$$= \frac{19,5022}{16,703 \cdot 21,5229 \cdot 15,2423 \cdot 12,1349} = \frac{19,5022}{66493,92603} = 2,93292 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{13} = \frac{Y_{E.13}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_4 = 2500)} =$$

$$= \frac{27,5384}{37,6329 \cdot 11,2675 \cdot 15,2423 \cdot 12,9603} = \frac{27,5384}{83764,6567} = 3,28759 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{14} = \frac{Y_{E.14}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_1 = 400)} =$$

$$= \frac{25,1398}{37,6329 \cdot 13,395 \cdot 16,0371 \cdot 12,1349} = \frac{25,1398}{98100,77616} = 2,56265 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{15} = \frac{Y_{E.15}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_2 = 20) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_3 = 1700)} =$$

$$= \frac{39,6878}{37,6329 \cdot 16,513 \cdot 12,4644 \cdot 17,4005} = \frac{39,6878}{6,2935} = 2,94462 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{16} = \frac{Y_{E.16}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_2 = 800)} =$$

$$= \frac{58,4906}{37,6329 \cdot 21,5229 \cdot 14,0501 \cdot 15,4009} = \frac{58,4906}{175264,513} = 3,33727 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 33 – Значення коефіцієнта B для всіх 16-ти дослідів планованого експеримента

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$3,7416 \cdot 10^{-4}$	$3,4282 \cdot 10^{-4}$	$4,673 \cdot 10^{-4}$	$3,8179 \cdot 10^{-4}$	$1,6855 \cdot 10^{-4}$	$2,1168 \cdot 10^{-4}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
R	$2,9514 \cdot 10^{-4}$	$2,3608 \cdot 10^{-4}$	$3,2157 \cdot 10^{-4}$	$4,3529 \cdot 10^{-4}$	$3,6083 \cdot 10^{-4}$	$2,9329 \cdot 10^{-4}$
№експ.	13	14	15	16		
R	$3,2876 \cdot 10^{-4}$	$2,5626 \cdot 10^{-4}$	$2,9446 \cdot 10^{-4}$	$3,3373 \cdot 10^{-4}$		

У табл. 34 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$). Значення Δ обчислюється за формулою

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,7827 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{17/16} = 1,4119 \cdot 10^{-4}$$

За цим значенням межі інтервалу виділення артефактів: $1,7773 \cdot 10^{-4} - 4,6011 \cdot 10^{-4}$.

Таблиця 34 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,1892 \cdot 10^{-4}$	$0,6126 \cdot 10^{-8}$	$0,7827 \cdot 10^{-4}$	1,75 $\alpha=0,1$	$4,673 \cdot 10^{-4}$; $1,6855 \cdot 10^{-4}$	$3,1899 \cdot 10^{-4}$	$0,3639 \cdot 10^{-8}$	$0,6032 \cdot 10^{-4}$

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma'_B}{B'_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,6032}{3,1899} \cdot 100\% = 18,9\%.$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,1899 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За значенням коефіцієнту B_{CP} рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$Y_{M,i} = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D) = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot \left(-4,768 + 0,6458123 \sqrt{A_j} \right)^2 \cdot x(1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943) \cdot x(0,03974 \cdot C_j + 12,46048) \cdot x(7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2).$$

Обчислимо значення функції за формулою багатofакторної моделі $Y_{M,i}$ для кожного i -того дослідів факторного експерименту, $i=1-16$.

$$Y_{M1} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 1988,18649 = 0,6342. \quad Y_{M2} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 2845,503734 = 0,9077.$$

$$Y_{M3} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 4522,145786 = 1,4425. \quad Y_{M4} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 7006,648405 = 2,2350.$$

$$Y_{M5} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 19986,04056 = 6,3753. \quad Y_{M6} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 25514,21497 = 8,1388.$$

$$Y_{M7} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 20219,42763 = 6,4498. \quad Y_{M8} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 24969,76641 = 7,9651.$$

$$Y_{M9} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 46011,1609 = 14,6771. \quad Y_{M10} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 42949,16033 = 13,7004.$$

$$Y_{M11} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 57327,28231 = 18,2869. \quad Y_{M12} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 66493,92603 = 21,2109.$$

$$Y_{M13} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 83764,6567 = 26,7201. \quad Y_{M14} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 98100,77616 = 31,2932.$$

$$Y_{M15} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 134780,4099 = 42,9938. \quad Y_{M16} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 175264,513 = 55,9076.$$

В табл. 35 наведено значення функції $Y_{M.i}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $Y_{E.i}$, обчисленої за наступним рівнянням

$$ВП\% = \frac{Y_{E.i} - Y_{M.i}}{Y_{E.i}} \cdot 100$$

Таблиця 35 – Експериментальні значення функції $Y_{E.i}$ і значення $Y_{M.i}$, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ досл.	A	B	C	D			ВП%
1	82	10	400	0,1	0,7439	0,6342	14,8
2	82	15	2500	40	0,9755	0,9077	6,95
3	82	20	800	70	2,1132	1,4425	<u>31,7</u>
4	82	25	1700	90	2,6751	2,235	16,4
5	133	10	800	90	3,3686	6,3753	<u>-89,3</u>
6	133	15	1700	70	5,4009	8,1388	-50,7
7	133	20	400	40	5,9675	6,4498	-8,1
8	133	25	2500	0,1	5,895	7,965	-35,1
9	188	10	1700	40	14,7959	14,6771	0,8
10	188	15	800	0,1	18,6954	13,7004	26,7
11	188	20	2500	90	20,6856	18,2869	11,6
12	188	25	400	70	19,5022	21,2109	-8,8
13	285	10	2500	70	27,5384	26,7201	3,0
14	285	15	400	90	25,1398	31,2932	-24,5
15	285	20	1700	0,1	39,6878	42,9938	-8,3
16	285	25	800	40	58,4906	55,9076	4,4

Середнє значення відносної похибки без артефактів 31,7% і 89,3%, відбракованих за вибіркою значень коефіцієнта B: $ВП_{CP}=15,7\%$.

Додаток В

Методика аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 при відсутності розподілу діапазону поглиблення на інтервали геологічних досліджень

Таблиця Д2 – Значення технологічних параметрів в інтервалі поглиблення 33-253 м закінченої свердловини

№	Глибина, м	Навтаження на долото $F_{д,тс}$	Обертний момент ротора $T_{об,р,кН\cdot м}$	Частота обертання ротора $n_{р,хв^{-1}}$	Частота обертання долота $n_{д,хв^{-1}}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех,м/год}$
1	34	0,57	7,3	47,76	47,76	3,03
2	35	0,59	9,9	48,48	48,48	62,14
3	36	0,62	6,5	49,2	49,2	93,21
4	37	1,03	5,95	49,2	49,2	48,55
5	38	0,49	3,69	42,0	42,0	25,28
6	39	0,99	7,32	44,16	44,16	30,68
7	40	0,78	5,68	46,32	46,32	15,98
8	41	1,03	6,84	46,08	46,08	40,86
9	42	1,39	6,99	44,4	44,4	36,66
10	43	0,89	5,95	45,12	41,61	41,61
11	44	1,03	7,32	42,72	42,72	46,62
12	45	0,91	7,31	46,56	46,56	83,73
13	46	1,67	7,14	49,44	49,44	67,44
14	47	1,79	7,31	55,92	55,92	39,31
15	48	1,0	3,1	29,17	29,17	20,48
16	49	1,08	3,79	29,17	29,17	9,23
17	50	1,16	0,92	29,17	29,17	10,15
18	51	1,18	0,97	29,91	29,91	9,85
19	52	1,19	1,03	29,17	29,17	8,92
20	53	1,2	1,09	29,17	29,17	8,0
21	54	1,21	1,14	29,54	29,54	98,32
22	55	1,22	1,2	30,28	30,28	142,51
23	56	1,24	1,26	31,38	31,38	113,01
24	57	1,25	1,32	31,38	31,38	59,98
25	58	1,26	1,37	31,38	31,38	34,84
26	59	1,27	1,43	31,38	31,38	22,27
27	60	1,29	1,49	32,12	32,12	17,75
28	61	1,3	1,54	32,12	32,12	13,97
29	62	1,87	1,6	32,49	32,49	12,07
30	63	2,1	1,66	31,75	31,75	6,29
31	64	2,21	1,72	32,49	32,49	21,11
32	65	1,69	1,77	38,89	38,89	27,91
33	66	1,56	1,83	38,89	38,89	27,11
34	67	1,36	1,89	38,15	38,15	25,18
35	68	1,33	1,95	38,15	38,15	26,82
36	69	0,99	2,0	38,15	38,15	20,97
37	70	1,64	2,06	38,15	38,15	23,5
38	71	2,29	2,12	38,89	38,89	17,81
39	72	1,84	2,17	40,0	40,0	14,97
40	73	1,87	2,23	41,11	41,11	14,64
41	74	1,89	2,29	42,22	42,22	14,25
42	75	1,84	2,35	42,96	42,96	15,95
43	76	2,52	2,4	42,96	42,96	12,02
44	77	0,99	2,46	42,96	42,96	15,28
45	78	1,47	2,52	42,96	42,96	17,51
46	79	2,83	2,57	42,96	42,96	18,8

Продовження табл. Д2

№	Глибина, м	F_D , тс	$T_{об.р}$, кН·м	n_P , хв ⁻¹	n_D , хв ⁻¹	$V_{мех}$, м/год
47	80	2,01	2,63	42,96	42,96	16,01
48	81	1,44	2,69	42,96	42,96	17,42
49	82	1,66	2,75	42,96	42,96	9,07
50	83	1,57	2,8	42,22	42,22	20,94
51	84	1,47	2,86	41,48	41,48	25,79
52	85	1,33	2,55	39,63	39,63	20,11
53	86	1,07	2,98	38,52	38,52	13,92
54	87	1,41	3,03	37,41	37,41	11,31
55	88	0,82	3,09	37,04	37,04	11,29
56	89	1,01	3,15	37,04	37,04	12,33
57	90	0,85	3,2	37,04	37,04	13,79
58	91	1,13	3,26	37,04	37,04	7,18
59	92	1,24	3,32	37,04	37,04	8,88
60	93	0,79	3,38	37,78	37,78	10,23
61	94	1,36	3,43	38,52	38,52	10,9
62	95	1,47	3,49	39,63	39,63	11,13
63	96	1,5	3,55	41,11	41,11	10,17
64	97	1,3	3,6	42,59	42,59	10,33
65	98	1,73	3,66	43,7	43,7	14,65
66	99	1,07	3,72	45,19	45,19	18,8
67	100	2,03	3,78	45,56	45,56	20,36
68	101	1,64	3,83	45,56	45,56	14,06
69	102	1,84	3,89	45,56	45,56	7,01
70	103	1,5	3,95	45,19	45,19	8,98
71	104	1,16	4,0	42,96	42,96	5,66
72	105	1,18	4,06	40,74	40,74	10,86
73	106	1,19	4,12	38,15	38,15	19,1
74	107	1,2	4,18	34,07	34,07	31,9
75	108	1,21	4,23	30,49	30,49	21,87
76	109	1,22	4,29	30,91	30,91	13,15
77	110	1,24	4,35	31,32	31,32	34,67
78	111	1,25	4,41	31,73	31,73	74,89
79	112	1,26	4,46	37,78	37,78	58,51
80	113	1,27	4,52	37,04	37,04	30,47
81	114	1,29	4,58	36,67	36,67	98,32
82	115	1,3	4,63	35,93	35,93	142,51
83	116	1,87	4,69	35,93	35,93	113,01
84	117	2,1	4,75	37,78	37,78	59,98
85	118	2,21	4,81	39,63	39,63	34,84
86	119	1,69	4,86	41,85	41,85	22,27
87	120	1,56	4,92	43,7	43,7	17,75
88	121	1,36	4,98	45,56	45,56	13,97
89	122	1,33	5,03	46,3	46,3	12,07
90	123	0,99	5,09	46,3	46,3	6,29
91	124	1,64	5,15	45,93	45,93	21,11
92	125	2,29	5,21	44,81	44,81	27,91
93	126	1,84	5,26	44,07	44,07	27,11
94	127	1,87	5,32	42,96	42,96	25,18
95	128	1,89	5,38	42,59	42,59	26,82
96	129	1,84	5,44	42,59	42,59	20,97
97	130	2,52	5,49	42,59	42,59	23,5
98	131	0,99	5,55	42,59	42,59	17,81
99	132	1,47	5,61	42,59	42,59	14,97
100	133	2,83	5,66	42,59	42,59	14,64

Продовження табл. Д2

№	Глибина, м	F_D , тс	$T_{об.р}$, кН·м	n_P , хв ⁻¹	n_D , хв ⁻¹	$V_{мех}$, м/год
101	134	2,01	5,72	42,59	42,59	14,25
102	135	1,44	5,78	42,59	42,59	15,96
103	136	1,66	5,84	42,59	42,59	12,02
104	137	1,57	5,89	42,59	42,59	15,28
105	138	1,47	5,95	43,33	43,33	17,51
106	139	1,33	6,01	44,44	44,44	18,08
107	140	1,07	6,06	44,81	44,81	16,01
108	141	1,41	6,57	42,0	42,0	17,42
109	142	0,82	7,0	41,28	41,28	9,07
110	143	1,01	7,29	42,72	42,72	20,94
111	144	0,85	4,03	46,56	46,56	25,79
112	145	1,13	4,04	45,36	45,36	20,11
113	146	1,24	5,1	45,6	45,6	13,92
114	147	0,79	7,11	44,4	44,4	11,31
115	148	1,36	7,18	46,8	46,8	11,29
116	149	1,47	7,24	44,28	44,28	12,33
117	150	1,5	7,364	41,76	41,76	13,79
118	151	1,3	6,28	45,12	45,12	7,18
119	152	1,73	6,64	44,52	44,52	8,88
120	153	1,07	7,01	43,92	43,92	10,23
121	154	2,03	7,28	44,64	44,64	10,9
122	155	1,64	6,89	46,8	46,8	11,13
123	156	1,84	6,1	48,24	48,24	10,17
124	157	1,5	7,03	47,52	47,52	10,33
125	158	2,83	7,2	44,64	44,64	14,65
126	159	2,01	6,88	48,0	48,0	18,8
127	160	1,44	5,49	46,56	46,56	20,36
128	161	1,66	6,98	47,07	47,04	14,06
129	162	1,57	7,14	46,32	46,32	7,01
130	163	1,47	7,29	45,6	45,6	8,98
131	164	1,33	5,19	45,85	45,84	5,66
132	165	1,07	7,29	43,92	43,92	10,86
133	166	1,41	3,26	46,32	46,32	19,1
134	167	0,82	4,89	46,08	46,08	31,9
135	168	1,01	6,44	45,36	45,36	21,87
136	169	0,85	3,19	46,08	46,08	13,15
137	170	1,13	3,69	45,84	45,84	18,08
138	171	1,24	6,37	45,6	45,6	16,01
139	172	0,79	3,47	45,6	45,6	17,42
140	173	1,36	5,51	50,16	50,16	9,07
141	174	1,47	3,82	49,68	49,68	20,94
142	175	1,5	4,29	49,68	49,68	25,79
143	176	1,3	5,7	49,92	49,92	20,11
144	177	1,73	4,67	49,92	49,92	13,92
145	178	1,07	6,28	49,92	49,92	11,31
146	179	2,03	7,22	47,76	47,76	11,29
147	180	1,64	7,19	48,48	48,48	12,33
148	181	1,84	7,26	48,0	48,0	13,79
149	182	1,5	6,72	43,2	43,2	7,18
150	183	1,5	5,08	45,12	45,12	8,88

Продовження табл. Д2

№	Глибина, м	F_D , тс	$T_{об.р}$, кН·м	n_P , хв ⁻¹	n_D , хв ⁻¹	$V_{мех}$, м/год
151	184	1,51	6,2	46,56	46,56	10,23
152	185	1,53	7,31	48,0	48,0	10,9
153	186	1,36	6,66	50,88	50,88	11,13
154	187	1,33	3,96	51,36	51,36	10,17
155	188	2,15	4,56	51,6	51,6	10,33
156	189	1,96	6,49	49,44	49,44	14,65
157	190	1,73	7,27	48,48	48,48	18,8
158	191	1,73	7,13	49,92	49,92	20,36
159	192	1,92	3,13	47,52	47,52	14,06
160	193	2,03	5,6	47,28	47,28	7,01
161	194	2,43	3,14	46,56	46,56	8,98
162	195	2,15	3,97	46,56	46,56	5,66
163	196	1,47	6,03	46,56	46,56	10,86
164	197	1,67	4,76	47,04	47,04	19,1
165	198	1,92	4,85	47,28	47,28	31,9
166	199	1,67	3,72	46,8	46,8	21,87
167	200	1,98	4,48	46,8	46,8	13,15
168	201	1,58	6,22	43,44	43,44	22,56
169	202	1,58	6,22	43,44	43,44	22,56
170	203	1,35	7,12	43,2	43,2	15,65
171	204	1,73	5,24	43,68	43,68	11,78
172	205	2,03	3,57	43,44	43,44	5,87
173	206	1,76	4,89	41,76	41,76	11,38
174	207	1,73	6,87	41,76	41,76	11,52
175	208	2,54	7,26	38,16	38,16	14,59
176	209	2,72	7,24	35,28	35,28	25,03
177	210	2,94	7,27	41,76	41,76	24,86
178	211	1,67	3,9	48,0	48,0	27,69
179	212	2,57	5,92	44,16	44,16	20,4
180	213	1,86	5,05	45,84	45,84	11,3
181	214	1,47	4,53	44,88	44,88	8,42
182	215	1,41	5,33	45,6	45,6	7,08
183	216	1,7	7,19	44,64	44,64	5,79
184	217	1,53	2,78	45,36	45,36	7,34
185	218	1,64	5,53	45,12	45,12	11,9
186	219	1,73	2,82	45,36	45,36	11,55
187	220	2,06	4,02	45,36	45,36	14,58
188	221	1,64	6,71	47,52	47,52	17,92
189	222	1,5	3,33	47,04	47,04	21,15
190	223	1,35	5,25	48,0	48,0	29,54
191	224	1,61	3,58	47,76	47,76	9,76
192	225	1,41	3,15	47,28	47,28	10,6
193	226	1,55	2,71	48,24	48,24	12,12
194	227	1,81	4,04	47,04	47,04	10,57
195	228	1,61	5,42	46,32	46,32	11,03
196	229	1,61	4,9	46,56	46,56	14,65
197	230	1,55	7,26	46,56	46,56	15,81
198	231	1,44	6,51	44,16	44,16	11,23
199	232	1,84	7,26	44,16	44,16	17,67
200	233	1,3	6,99	42,96	42,96	50,06
201	234	2,24	7,12	43,68	43,68	39,03

Продовження табл. Д2

№	Глибина, м	$F_d, \text{тс}$	$T_{об.р}, \text{кН} \cdot \text{м}$	$n_p, \text{хв}^{-1}$	$n_d, \text{хв}^{-1}$	$V_{\text{мех}}, \text{м/год}$
202	235	2,27	7,26	41,04	41,04	8,36
203	236	2,21	5,6	43,44	43,44	7,68
204	237	1,98	7,13	41,76	41,76	5,98
205	238	1,38	4,23	42,48	42,48	7,92
206	239	2,24	7,24	39,36	39,36	8,64
207	240	1,78	6,74	43,92	43,92	9,51
208	241	1,76	4,64	45,84	45,84	19,27
209	242	1,84	7,25	42,0	42,0	18,41
210	243	1,32	5,13	51,12	51,12	17,0
211	244	1,38	3,67	50,88	50,88	17,16
212	245	1,2	7,25	49,92	49,92	12,78
213	246	1,57	4,7	51,36	51,36	17,15
214	247	1,86	5,22	50,64	50,64	13,59
215	248	1,35	2,82	51,6	51,6	12,58
216	249	1,65	3,49	50,64	50,64	7,23
217	250	1,48	5,91	42,48	42,48	13,69
218	251	1,8	7,03	40,32	40,32	9,97
219	252	1,4	3,15	42,24	42,24	21,2
220	253	1,91	5,43	41,28	41,28	18,48
221	254	1,48	5,49	41,52	41,52	20,36
222	255	1,48	4,94	41,52	41,52	11,26

Перший етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська - 104 при відсутності розподілу діапазону поглиблення на інтервали з використанням геологічних досліджень". Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини

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

Формування об'єму першої вибірки пар значень H_B і T_B першої ділянки заглиблення свердловини починається з початкового значення аналізованого інтервалу свердловини. Перший крок дискретизації – 33-34 м. Механічна швидкість буріння 1м – 3,03 м/год. Значення першої пари T_B і H_B при глибині свердловини 33 м прирівнюємо до нуля. Мінімальний об'єм вибірки – п'ять пар значень, включаючи і нульову, що відповідає мінімальній кількості точок, необхідних для підбору апроксимуючого рівняння лінійної регресії.

Приклад визначення часу буріння ΔT_B для інтервалу заглиблення 33-34 м –

$$\Delta T_B = \frac{\Delta H_B}{\Delta V_{\text{мех}}} = \frac{1}{3,03} = 0,3300 \text{ год} \rightarrow 60 \cdot 0,33 = 19,8 \text{ хв.}$$

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

Таблиця 1.1.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина свердловини за метровим інтервалом дискретизації, м		33	34	35	36	37
Проходка H_B , м		0	1	2	3	4
$V_{\text{мех},i}$, м/год		0	3,03	62,14	93,21	48,55
Час буріння метрового інтервалу свердловини ΔT_B	год	0	0,3300	0,0161	0,0107	0,0206
	хв	0	19,80	0,97	0,64	1,24
Загальний час буріння T_B , хв		0	19,8	20,77	21,41	22,65

Таблиця 1.1.2 – Перевірка програмою App.2 трьох умов лінійності за даними табл.1.1.1

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,1294	-0,191	3,92778	10	6,07222	4,64	2,15	0,7792	0,991	2,0
Перша умова лінійності не виконується, нульова гіпотеза підтверджена: $F_{СП} = 4,638 < F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A=0$										
Друга умова лінійності не виконується, нульова гіпотеза підтверджена: $T_{СП} = 2,15 < T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r = 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,991 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

При перевірці першої умови приймається рівень значущості $\alpha=0,01$, при перевірці другої- $\alpha=0,05$. За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм вибірки пар значень H_B і T_B починаючи з другої пари аналізованого інтервалу заглиблення – глибина 34 м. Значення цієї пари T_B і H_B при глибині 34 м, початок відліку, прирівнюємо до нуля, табл.1.1.3.

Таблиця 1.1.3 Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина свердловини за метровим інтервалом дискретизації, м		34	35	36	37	38
Проходка – H_B , м		0	1	2	3	4
$V_{MEH,i}$, м/год		-	62,14	93,21	48,55	25,28
Час буріння метрового інтервалу свердловини ΔT_B	год	0	0,0161	0,0107	0,0206	0,0396
	хв	0	0,97	0,64	1,24	2,38
Загальний час буріння – T_B , хв		0	0,97	1,61	2,85	5,23

В табл.1.1.4 наведено результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$

Таблиця 1.1.4 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.3

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,7579	0,3841	0,64720	10	9,35280	43,4	6,58	0,9671	0,402	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 43,4 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 6,58 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,402 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм вибірки пар значень H_B і T_B починаючи з третьої пари аналізованого інтервалу заглиблення – початкова глибина 35м. Значення цієї пари T_B і H_B прирівнюємо до нуля, табл. 1.1.5

Таблиця 1.1.5 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина свердловини за метровим інтервалом дискретизації, м		35	36	37	38	39
Проходка – H_B , м		0	1	2	3	4
$V_{MEH,i}$, м/год		-	93,21	48,55	25,28	30,68
Час буріння метрового інтервалу свердловини ΔT_B	год	0	0,0107	0,0206	0,0396	0,0326
	хв	0	0,64	1,24	2,38	1,96
Загальний час буріння – T_B , хв		0	0,64	1,88	4,26	6,22

Таблиця 1.1.6 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.5

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,5965	0,4515	0,43849	10	9,56151	65,4	8,09	0,9778	0,331	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 65,4 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 8,09 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,331 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$.										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм вибірки пар значень H_B і T_B починаючи з четвертої пари аналізованого інтервалу заглиблення – початкова глибина 36 м. Значення цієї пари T_B і H_B прирівнюємо до нуля, табл. 1.1.7

Таблиця 1.1.7 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	36	37	38	39	40
H_B , м	0	1	2	3	4
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	-	48,55	25,28	30,68	15,98
ΔT_B	год	0	0,021	0,0326	0,0626
	хв	0	1,24	2,37	3,75
T_B ,хв	0	1,24	3,61	5,57	9,32

Таблиця 1.1.8 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.7

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,4213	0,3368	0,32305	10	9,67695	89,9	9,48	0,9937	0,284	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 89,9 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 9,48 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,284 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм вибірки пар значень H_B і T_B починаючи з п'ятої пари аналізованого інтервалу заглиблення – початкова глибина 37 м. Значення цієї пари T_B і H_B прирівнюємо до нуля, табл. 1.1.9.

Таблиця 1.1.9 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	37	38	39	40	41
H_B , м	0	1	2	3	4
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	-	25,28	30,68	15,98	40,86
ΔT_B	год	0	0,0396	0,0326	0,0245
	хв	0	2,37	1,96	3,75
T_B ,хв	0	2,37	4,33	8,08	9,55

Таблиця 1.1.10 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.9

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,2972	0,0673	0,14589	10	9,85411	202,6	14,2	0,9927	0,191	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 202,6 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 14,2 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,191 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо початковий мінімальний об'єм першої вибірки на одну пару значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 41-42 м, табл. 1.1.11.

Таблиця 1.1.11 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св., м		37	38	39	40	41	42
H_B , м		0	1	2	3	4	5
V_{MEK} , м/ГОД		-	25,28	30,68	15,98	40,86	36,66
ΔT_B	ГОД	0	0,0396	0,0326	0,0626	0,0245	0,0273
	ХВ	0	2,37	1,96	3,75	1,47	1,64
T_B , ХВ		0	2,37	4,33	8,08	9,55	11,19

Таблиця 1.1.12 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.11

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
6	0,4240	-0,0103	0,27541	17,5	17,22459	250,2	15,8	0,9921	0,235	2,5
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 250,2 > F_{KP(0,01;1;4)} = 21,2; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 15,8 > T_{KP(0,05;3)} = 2,78; r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,235 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,5 = 0,25$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм першої вибірки до семи пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 37-43 м, табл. 1.1.13.

Таблиця 1.1.13 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	37	38	39	40	41	42	43	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	
V_{MEK} , м/год	-	25,28	30,68	15,98	40,86	36,66	41,61	
ΔT_B	год	0	0,0396	0,0326	0,0626	0,0245	0,0273	0,0240
	хв	0	2,37	1,96	3,75	1,47	1,64	1,44
T_B ,хв	0	2,37	4,33	8,08	9,55	11,19	12,63	

Таблиця 1.1.14 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. ВОДПС.1.13

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
7	0,4521	-0,1095	0,53729	28	27,46271	255,6	16,0	0,9903	0,299	3,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 255,6 > F_{KP(0,01;1;5)} = 16,26; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 16 > T_{KP(0,05;5)} = 2,57; r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,299 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 3 = 0,3$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм першої вибірки до восьми пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 37-44 м, табл. 1.1.15.

Таблиця 1.1.15 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	37	38	39	40	41	42	43	44
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{MEX} , м/год	-	25,28	30,68	15,98	40,86	36,66	41,61	46,62
ΔT_B	год	0	0,0396	0,0326	0,0626	0,0245	0,0273	0,0240
	хв	0	2,37	1,96	3,75	1,47	1,64	1,28
T_B ,хв	0	2,37	4,33	8,08	9,55	11,19	12,63	13,91

Таблиця 1.1.16 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.1.15

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
8	0,4805	-0,2275	0,98384	42	41,01616	250,1	15,8	0,9882	0,375	3,5
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 250,1 > F_{KP(0,01;1;3)} = 13,74; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 15,8 > T_{KP(0,05;3)} = 2,45; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,375 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 3,5 = 0,35$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

За вищенаведеним матеріалом перша однорідна за буримістю ділянка виділена в інтервалі заглиблення свердловини 37-43м, об'єм буріння – 6 м.

За рівнянням лінійної регресії: $H_{B.f} = 0,4521 \cdot T_B - 0,1095 = 0,4521 \cdot 12,63 - 0,1095 = 5,6$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 37-43 м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 5,6 \text{ м} / 0,2105 \text{ год} = 26,60 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 6 \text{ м} / 0,2105 \text{ год} = 28,50 \text{ м} / \text{год}$.

2. Формування об'єму другої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню другої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 43 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу першої ділянки, табл. 1.2.1.

Таблиця 1.2.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	43	44	45	46	47
H_B , м	0	1	2	3	4
V_{MEH} , м/ГОД	-	46,62	83,73	67,44	39,31
ΔT_B	ГОД	0,0214	0,0119	0,0148	0,0254
	ХВ	0	1,28	0,71	0,89
T_B ,ХВ	0	1,28	1,99	2,88	4,40

Таблиця 1.2.2 –Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.1

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,9461	0,0037	0,16047	10	9,83953	183,9	13,6	0,9916	0,2002	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 183,9 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 13,6 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,20 \approx 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

При орієнтовній рівності $\sigma_0 \approx 0,1\bar{H}_B$, за методикою, потрібно збільшити об'єм вибірки підбору залежності $H_B = A \cdot T_B + B$ на одне значення T_B і H_B , для конкретного випадку додати інтервал 47-48 м, табл. 1.2.3.

Таблиця 1.2.3 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	43	44	45	46	47	48
H_B , м	0	1	2	3	4	5
V_{MEH} , м/ГОД	0	46,62	83,73	67,44	39,31	20,48
ΔT_B	ГОД	0,0214	0,0119	0,0148	0,0254	0,0488
	ХВ	0	1,28	0,71	0,89	1,52
T_B ,ХВ	0	1,28	1,99	2,88	4,40	7,33

Таблиця 1.2.4 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.3

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
6	0,6958	0,4263	1,18213	17,5	16,31787	55,2	7,4	0,9656	0,486	2,5
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 55,2 > F_{KP(0,01;1;3)} = 21,2; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 7,4 > T_{KP(0,05;3)} = 2,78; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,487 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,5 = 0,25$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм пар значень H_B і T_B по виділенню другої ділянки починаючи з глибини 44 м. Значення пари T_B і H_B при глибині 44 м, початок відліку, порівнюємо до нуля, табл. 1.2.5.

Таблиця 1.2.5 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	44	45	46	47	48
H_B , м	0	1	2	3	4
V_{MEH} , м/год	-	83,73	67,44	39,31	20,48
ΔT_B	год	0,0119	0,0148	0,0254	0,0488
	хв	0,71	0,89	1,52	2,93
T_B ,хв	0	0,71	1,6	3,12	6,05

Таблиця 1.2.6 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.5

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,6297	0,5542	0,86313	10	9,13687	31,7	5,63	0,9559	0,464	2,0
Перша умова лінійності не виконується, нульова гіпотеза підтверджена: $F_{СП} = 31,7 < F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A=0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 5,63 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,464 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,0 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм пар значень H_B і T_B по виділенню другої ділянки починаючи з глибини 45 м. Значення пари T_B і H_B при глибині 45 м, початок відліку, прирівнюємо до нуля, табл. ВОДПС.2.7.

Таблиця 1.2.7 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B ,хв

Глибина св.,м	45	46	47	48	49
H_B , м	0	1	2	3	4
V_{MEH} , м/год	-	67,44	39,31	20,48	9,23
ΔT_B	год	0,0148	0,0254	0,0488	0,1083
	хв	0,89	1,52	2,93	6,5
T_B ,хв	0	0,89	2,41	5,34	11,84

Таблиця 1.2.8 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.7

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,3077	0,7396	1,34394	10	8,65606	19,3	4,4	0,9304	0,580	2,0
Перша умова лінійності не виконується, нульова гіпотеза підтверджена: $F_{СП} = 19,3 < F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A=0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 4,4 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,58 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,0 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм пар значень H_B і T_B по виділенню другої ділянки починаючи з глибини 46 м. Значення пари T_B і H_B при глибині 46 м, початок відліку, рівні нулю, табл. 1.2.9.

Таблиця 1.2.9 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м		46	47	48	49	50
H_B , м		0	1	2	3	4
V_{MEH} , м/год		-	39,31	20,48	9,23	10,15
ΔT_B	год	0	0,0254	0,0488	0,1083	0,0985
	хв	0	1,52	2,93	6,50	5,91
T_B ,хв		0	1,52	4,45	10,95	16,86

Таблиця 1.2.10 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.9

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,2179	0,5281	0,59907	10	9,40093	47,1	6,9	0,9696	0,387	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 47,1 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 6,9 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,387 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,0 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Формуємо новий мінімальний початковий об'єм пар значень H_B і T_B по виділенню другої ділянки починаючи з глибини 47 м. Значення пари T_B і H_B при глибині 47 м, початок відліку, прирівнюємо до нуля, табл. 1.2.11.

Таблиця 1.2.11 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B ,хв

Глибина св.,м		47	48	49	50	51
H_B , м		0	1	2	3	4
V_{MEH} , м/год		-	20,48	9,23	10,15	9,85
ΔT_B	год	0	0,0488	0,1083	0,0985	0,1015
	хв	0	2,93	6,50	5,91	6,09
T_B ,хв		0	2,93	9,43	15,34	21,43

Таблиця 1.2.12 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.11

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
5	0,1787	0,2443	0,12420	10	9,87580	239	15,4	0,9938	0,176	2,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 239 > F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 15,4 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18; r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,176 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм вибірки для виділення другої лінійної ділянки до шести пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 47-52м, табл.1.2.13.

Таблиця 1.2.13 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м		47	48	49	50	51	52
H_B , м		0	1	2	3	4	5
V_{MEH} , м/год		-	20,48	9,23	10,15	9,85	8,92
ΔT_B	год	0	0,0488	0,1083	0,0985	0,1015	0,1121
	хв	0	2,93	6,50	5,91	6,09	6,73
T_B ,хв		0	2,93	9,43	15,34	21,43	28,16

Таблиця 1.2.14 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.13

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
6	0,1715	0,2904	0,15750	17,5	17,34250	440	21	0,9955	0,177	2,5
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 440 > F_{KP(0,01;4)} = 21,2$; $A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 21 > T_{KP(0,05;3)} = 2,78$; $r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,177 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2,5 = 0,25$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм вибірки для виділення другої лінійної ділянки до семи пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 47-53 м, табл. 1.2.15.

Таблиця 1.2.15 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B ,хв

Глибина св.,м		47	48	49	50	51	52	53
H_B , м		0	1	2	3	4	5	6
V_{MEH} , м/год		-	20,48	9,23	10,15	9,85	8,92	8,0
ΔT_B	год	0	0,0488	0,1083	0,0985	0,1015	0,1121	0,125
	хв	0	2,93	6,50	5,91	6,09	6,73	7,5
T_B ,хв		0	2,93	9,43	15,34	21,43	28,16	35,66

Таблиця 1.2.16 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.15

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
7	0,1638	0,3563	0,23849	28	27,76151	582	24,1	0,9957	0,199	3,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 582 > F_{KP(0,01;5)} = 16,26$; $A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 241 > T_{KP(0,05;5)} = 2,57$; $r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,199 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 3 = 0,3$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм вибірки для виділення другої лінійної ділянки до восьми пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 47-54 м, табл. 1.2.17.

Таблиця 1.1.2.17 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	47	48	49	50	51	52	53	54
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7
V_{MEX} , м/год	-	20,48	9,23	10,15	9,85	8,92	8,0	98,32
ΔT_B	год	0	0,0488	0,1083	0,0985	0,1015	0,1121	0,125
	хв	0	2,93	6,50	5,91	6,09	6,73	7,5
T_B ,хв	0	2,93	9,43	15,34	21,43	28,16	35,66	36,27

Таблиця 1.2.18 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.17

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
8	0,1727	0,2780	0,55878	42	41,44122	445	21,1	0,9933	0,282	3,5
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 445 > F_{KP(0,01;1;6)} = 13,74; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 21,1 > T_{KP(0,05;6)} = 2,45; r \neq 0$										
Третя умова лінійності виконується: $\sigma_0 = 0,282 < 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 3,5 = 0,35$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії всі три умови виконуються. Залежність між величинами T_B і H_B задовільно апроксимується емпіричним рівнянням регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$.

Збільшуємо об'єм вибірки для виділення другої лінійної ділянки до дев'яти пар значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 47-55 м, табл. 1.2.19.

Таблиця 1.2.19 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B ,хв

Глибина св.,м	47	48	49	50	51	52	53	54	55
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8
V_{MEX} , м/год	-	20,48	9,23	10,15	9,85	8,92	8,0	98,32	142,51
ΔT_B	год	0	0,0488	0,1083	0,0985	0,1015	0,1121	0,125	0,0102
	хв	0	2,93	6,50	5,91	6,09	6,73	7,5	0,61
T_B ,хв	0	2,93	9,43	15,34	21,43	28,16	35,66	36,27	36,69

Таблиця 1.2.20 – Результати обчислень за програмою App.2 і перевірка умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за даними табл. 1.2.19

n	A	B	C	D	K	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	σ_0	$\bar{H}_B$
9	0,186	0,1586	1,96852	60	58,03148	206	14,4	0,9835	0,496	4,0
Перша умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $F_{СП} = 445 > F_{KP(0,01;1;7)} = 12,25; A \neq 0$										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена: $T_{СП} = 14,4 > T_{KP(0,05;6)} = 2,36; r \neq 0$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,496 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 4,0 = 0,4$										

За результатами перевірки умов лінійності емпіричне рівняння регресії між величинами T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

За вищенаведеним матеріалом друга однорідна за буримістю ділянка виділена в інтервалі заглиблення свердловини – 47-54 м, об'єм буріння – 7 м.

За рівнянням лінійної регресії: $H_{B.f} = 0,1727 \cdot T_B + 0,278 = 0,1727 \cdot 36,27 + 0,278 = 6,54$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 47-54м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 6,54 \text{ м} / 0,6045 \text{ год} = 10,82 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 7 \text{ м} / 0,6045 \text{ год} = 11,58 \text{ м} / \text{год}$.

3. Формування об'єму третьої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню третьої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 54 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу другої ділянки, табл. 1.3.1.

Таблиця 1.3.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEX} , м/год	-	142,51	113,01	59,98	34,84	22,27	17,75	13,97	12,07	6,29
ΔT_B	год	0	0,0070	0,0088	0,0167	0,0287	0,0449	0,056	0,0716	0,0828
	хв	0	0,42	0,53	1,00	1,72	2,69	3,38	4,29	4,97

Виділення третьої лінійної ділянки починаємо з мінімального об'єму вибірки для 5-ти пар значень T_B і H_B , інтервал 54-58 м. За методикою результати перевірки трьох умов лінійності для кожного аналізового об'єму можна подавати у вигляді узагальненої таблиці 1.3.2 (див. підрозділ 2.3, табл. 2.3.15).

Узагальнена таблиця 1.3.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 54-63 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{КР}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{КР}$ $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
54-58	-	-	5	33,2	3	34,12	5,76	3,18	2,0	0,46
55-59	-	-	5	34,8	3	34,12	5,9	3,18	2,0	0,47
56-60	-	-	5	61,7	3	34,12	7,9	3,18	2,0	0,34
57-61	-	-	5	112,7	3	34,12	10,6	3,18	2,0	0,25
58-62	0,2571	0,2283	5	206	3	34,12	14,35	3,18	2,0	0,19
58-63	-	-	6	71,6	4	21,2	8,46	2,78	2,5	0,43

Значення $F_{СП}$, за якого в перша умова лінійності не підтверджена, виділене жирним шрифтом. Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом. В табл. n' -це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень $F_{КР}$ і $T_{КР}$.

За табл.1.3.2 всі три умови лінійності підтверджуються тільки для п'ятого варіанту мінімального об'єму вибірки значень T_B і H_B , інтервал заглиблення 58-62 м.

За наведеним вище матеріалом третя однорідна за буримістю ділянка виділена в об'ємі буріння 4м.

Об'єм буріння за рівнянням: $H_{B,f} = 0,2571 \cdot T_B + 0,2283 = 0,2571 \cdot 15,33 + 0,2283 = 4,17 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 58-62м: за рівнянням регресії-
 $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 4,17 \text{ м} / 0,2555 \text{ год} = 16,32 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини-
 $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,2555 \text{ год} = 15,66 \text{ м} / \text{год}$.

4. Формування об'єму четвертої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню четвертої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 62 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу третьої ділянки, табл. 1.4.1.

Таблиця 1.4.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEH} , м/ГОД	-	6,29	21,11	27,91	27,11	25,18	26,82	20,97	23,5	17,81
ΔT_B	год	0	0,1590	0,0474	0,0358	0,0369	0,0397	0,0373	0,0477	0,0426
	хв	0	9,54	2,84	2,15	2,21	2,38	2,24	2,86	2,56
Глибина св.,м	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81
H_B , м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Об'єм вибірки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V_{MEH} , м/ГОД	14,97	14,64	14,25	15,96	12,02	15,28	17,51	18,08	16,01	17,42
ΔT_B	год	0,0668	0,0683	0,0702	0,0626	0,0832	0,0654	0,0571	0,0553	0,0625
	хв	4,01	4,1	4,21	3,76	4,99	3,92	3,43	3,32	3,75
T_B ,хв	24,62	28,72	32,93	36,69	41,68	45,6	49,03	52,35	56,1	59,54
Глибина св.,м	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
H_B , м	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Об'єм вибірки	20	21	22	23	24	25				
V_{MEH} , м/ГОД	9,07	20,94	25,79	20,11	13,92	11,31				
ΔT_B	год	0,1102	0,0478	0,0388	0,0497	0,0718	0,0884			
	хв	6,61	2,87	2,33	2,98	4,31	5,3			
T_B ,хв	66,15	69,02	71,35	74,33	78,64	83,94				

Виділення четвертої лінійної ділянки починаємо з першого варіанту мінімального об'єму вибірки для 5-ти пар значень T_B і H_B , інтервал 62-66 м. По мірі виконання трьох умов лінійності для аналізованого інтервалу його величина збільшується на 1м (крок дискретизації величини поглиблення свердловини) і перевіряються три умови лінійності. Результати обчислень наведено в узагальненій табл. 1.4.2.

Узагальнена таблиця 1.4.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 62-87 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
62-66	-	-	5	20,4	3	34,12	4,5	3,18	2,0	0,57
63-67	-	-	5	1251	3	34,12	35,4	3,18	2,0	0,08
63-68	-	-	6	2628	4	21,2	51,3	2,78	2,5	0,07
63-69	-	-	7	3098	5	16,26	55,7	2,57	3,0	0,09
63-70	-	-	8	4063	6	13,74	63,7	2,45	3,5	0,1
63-71	-	-	9	2066	7	12,25	45,5	2,36	4,0	0,16
63-72	-	-	10	978	8	11,26	31,3	2,31	4,5	0,27
63-73	-	-	11	706	9	10,56	26,6	2,26	5,0	0,37
63-74	-	-	12	622	10	10,04	24,9	2,23	5,5	0,45
63-75	-	-	13	661	11	9,86	25,7	2,2	6,0	0,50
63-76	-	-	14	639	12	9,33	25,3	2,18	6,5	0,57
63-77	-	-	15	698	13	9,07	25,4	2,16	7,0	0,60
63-78	-	-	16	827	14	8,86	28,7	2,14	7,5	0,61
63-79	-	-	17	1012	15	8,68	31,8	2,13	8,0	0,61
63-80	-	-	18	1230	16	8,53	35,1	2,12	8,5	0,60
63-81	-	-	19	1501	17	8,4	38,7	2,11	9,0	0,60
63-82	-	-	20	1547	18	8,28	39	2,10	9,5	0,63
63-83	-	-	21	1772	19	8,18	42,1	2,09	10	0,64
63-84	-	-	22	2129	20	8,1	46,1	2,09	10,5	0,63
63-85	0,2789	1,3336	23	2556	21	8,02	50,5	2,08	11	0,61
63-86	-	-	24	84,9	22	7,94	9,21	2,07	11,5	3,201
63-87	-	-	25	103,1	23	7,88	10,1	2,07	12	3,14

Значення $F_{СП}$, за якого в перша умова лінійності не підтверджена, виділене жирним шрифтом. Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень F_{KP} і T_{KP} .

За табл. 1.4.2 усі три умови лінійності підтверджуються тільки в інтервалі заглиблення 63-85м, тобто об'єм четвертої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 22 м.

Об'єм буріння за рівнянням: $H_{Б,ф} = 0,2789 \cdot T_{Б} + 1,3336 = 0,2789 \cdot 74,33 + 1,3336 = 22,06м$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 63-85м: за рівнянням регресії-
 $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б,ф} / T_{Б} = 22,06м / 1,2388 год = 17,81м / год$; за величиною заглиблення свердловини-
 $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 22м / 1,2388 год = 17,76м / год$.

5. Формування об'єму п'ятої вибірки пар значень $H_{Б}$ і $T_{Б}$

Формування мінімального об'єму по виділенню п'ятої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 85 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу четвертої ділянки, табл. 1.5.1.

Таблиця 1.5.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв

Глибина св.,м	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ}$, м/год	-	13,92	11,31	11,29	12,33	13,79	7,18	8,88	10,23	10,9
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0718	0,0884	0,0886	0,0811	0,0725	0,1393	0,1136	0,0978
	хв	0	4,31	5,3	5,32	4,87	4,35	8,36	6,81	5,50
$T_{Б}$,хв	0	4,31	9,61	14,93	19,8	24,15	32,51	39,32	45,19	50,69
Глибина св.,м	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
$H_{Б}$, м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Об'єм вибірки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{МЕХ}$, м/год	11,13	10,17	10,33	14,65	18,8	20,36	14,06	7,01	8,98	5,66
$\Delta T_{Б}$	год	0,0898	0,0983	0,0968	0,0682	0,0532	0,0491	0,0711	0,1427	0,1114
	хв	5,39	5,9	5,81	4,09	3,19	2,95	4,27	8,56	6,68
$T_{Б}$,хв	56,08	61,98	67,79	71,88	75,07	78,02	82,29	90,85	97,53	108,13
Глибина св.,м	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
$H_{Б}$, м	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Об'єм вибірки	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$V_{МЕХ}$, м/год	10,86	19,1	31,9	21,87	13,15	34,67	74,89	58,51	30,47	98,32
$\Delta T_{Б}$	год	0,0921	0,0524	0,0313	0,0457	0,0760	0,0288	0,0134	0,0171	0,0328
	хв	5,53	3,14	1,88	2,74	4,56	1,73	0,8	1,03	1,97
$T_{Б}$,хв	113,66	116,8	118,68	121,42	125,98	127,71	128,51	129,54	131,51	132,12

Узагальнена таблиця 1.5.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 85-109 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{КР}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{КР}$ $\alpha=0,05$	$\bar{H}_{Б}$	σ_0
85-89	-	-	5	2491	3	34,12	49,9	3,18	2,0	0,06
85-90	-	-	6	3386	4	21,2	58,2	2,78	2,5	0,06
85-91	-	-	7	678	5	16,26	26	2,57	3,0	0,18
85-92	-	-	8	655	6	13,74	25,6	2,45	3,5	0,23
85-93	-	-	9	914	7	12,25	30,3	2,36	4,0	0,24
85-94	-	-	10	1382	8	11,26	37,2	2,31	4,5	0,23
85-95	-	-	11	2071	9	10,56	45,5	2,26	5,0	0,22
85-96	-	-	12	2984	10	10,04	54,6	2,23	5,5	0,21
85-97	-	-	13	4173	11	9,86	64,6	2,2	6,0	0,20
85-98	-	-	14	5105	12	9,33	71,4	2,18	6,5	0,20
85-99	-	-	15	4198	13	9,07	64,8	2,16	7,0	0,25
85-100	-	-	16	2868	14	8,86	53,6	2,14	7,5	0,33
85-101	-	-	17	2419	15	8,68	49,2	2,13	8,0	0,4
85-102	-	-	18	2996	16	8,53	54,7	2,12	8,5	0,39
85-103	-	-	19	3749	17	8,4	61,2	2,11	9,0	0,38
85-104	-	-	20	3612	18	8,28	60,1	2,10	9,5	0,42
85-105	-	-	21	3871	19	8,18	62,2	2,09	10	0,43
85-106	-	-	22	4658	20	8,1	68,2	2,09	10,5	0,42

Продовження узагальнена табл. 1.5.2

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{КР}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{КР}$ $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
85-107	0,1799	0,2139	23	5272	21	8,02	72,2	2,08	11	0,43
85-108	-	-	24	54,8	22	7,94	7,4	2,07	11,5	3,78
85-109	-	-	25	67,06	23	7,88	8,19	2,07	12	3,72

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень $F_{КР}$ і $T_{КР}$.

За табл. 1.5.2 всі три умови лінійності підтверджуються тільки в інтервалі заглиблення 85-107 м, тобто об'єм п'ятої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 22 м. Об'єм буріння за рівнянням: $H_{Б.ф} = 0,1799 \cdot T_B + 0,2139 = 0,1799 \cdot 118,68 + 0,2139 = 21,56 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 85-107 м: за рівнянням регресії-
 $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 21,56 \text{ м} / 1,978 \text{ год} = 10,9 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини-
 $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 22 \text{ м} / 1,978 \text{ год} = 11,12 \text{ м} / \text{год}$.

6. Формування об'єму шостої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню шостої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 107 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу п'ятої ділянки, табл. 1.6.1.

Таблиця 1.6.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ}$, м/год	-	21,87	13,15	34,67	74,89	58,51	30,47	98,32	142,51	113,01
ΔT_B	год	0	0,0457	0,0760	0,0288	0,0134	0,0171	0,0328	0,0102	0,0070
	хв	0	2,74	4,56	1,73	0,8	1,03	1,97	0,61	0,42
T_B ,хв	0	2,74	7,3	9,03	9,83	10,86	12,83	13,44	13,86	14,39
Глибина св.,м	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122
H_B , м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Об'єм вибірки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{МЕХ}$, м/год	59,98	34,84	22,27	17,75	13,97	12,07	22,27	17,75	13,97	12,07
ΔT_B	год	0,0167	0,0287	0,0449	0,0563	0,0716	0,0828	0,0449	0,0563	0,0716
	хв	1,0	1,72	2,69	3,38	4,3	4,97	2,69	3,38	4,3
T_B ,хв	15,39	17,11	19,8	23,18	27,48	32,45	35,14	38,52	42,82	47,79
Глибина,м,м	123	H_B , м	20	Об'єм	21	ΔT_B	0,1560	9,36хв	T_B ,хв	57,15

Узагальнена таблиця 1.6.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 107-123–м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{КР}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{КР}$ $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
107-111	-	-	5	44,06	3	34,12	6,64	3,18	2,0	0,4
108-112	-	-	5	19,2	3	34,12	4,38	3,18	2,0	0,58
109-113	-	-	5	128,3	3	34,12	11,3	3,18	2,0	0,24
110-114	-	-	5	103,6	3	34,12	10,2	3,18	2,0	0,26
111-115	-	-	5	43,8	3	34,12	6,62	3,18	2,0	0,4
112-116	-	-	5	21,8	3	34,12	4,67	3,18	2,0	0,55
113-117	-	-	5	110,3	3	34,12	10,5	3,18	2,0	0,26
114-118	-	-	5	33,2	3	34,12	5,8	3,18	2,0	0,46
115-119	-	-	5	34,8	3	34,12	5,9	3,18	2,0	0,44
116-120	-	-	5	61,7	3	34,12	7,8	3,18	2,0	0,34
117-121	-	-	5	112,1	3	34,12	10,6	3,18	2,0	0,26
118-122	0,2569	0,2287	5	205,5	3	34,12	14,3	3,18	2,0	0,19
118-123	-	-	6	74,6	4	21,2	8,6	2,78	2,5	0,42

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень $F_{кр}$ і $T_{кр}$.

За наведеним вище матеріалом всі три умови лінійності підтверджуються тільки в інтервалі заглиблення 118-122 м, тобто об'єм шостої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 4 м. Об'єм буріння за рівнянням $H_{Б,ф} = 0,2569 \cdot T_B + 0,2287 = 0,2569 \cdot 15,34 + 0,2287 = 4,17$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 118-122 м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ,ф} = H_{Б,ф} / T_B = 4,17 \text{ м} / 0,2557 \text{ год} = 16,31 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,2557 \text{ год} = 15,64 \text{ м} / \text{год}$.

7. Формування об'єму сьомої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню сьомої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 122 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу шостої ділянки, табл. 1.7.1.

Таблиця 1.7.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	-	6,29	21,11	27,91	27,11	25,18	26,82	20,97	23,5	17,81
ΔT_B	год	0	0,1560	0,0474	0,0358	0,0369	0,0397	0,0373	0,0477	0,0426
	хв	0	9,36	2,84	2,15	2,21	2,38	2,24	2,86	2,56
T_B ,хв	0	9,36	12,2	14,35	16,56	18,94	21,18	24,04	26,6	29,97
Глибина св.,м	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141
H_B , м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Об'єм вибірки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	14,97	14,64	14,25	15,96	12,02	15,28	17,51	18,08	16,01	17,42
ΔT_B	год	0,0668	0,0683	0,0702	0,0626	0,0832	0,0654	0,0571	0,0553	0,0625
	хв	4,01	4,1	4,21	3,76	4,99	3,92	3,43	3,32	3,75
T_B ,хв	33,98	38,08	42,29	46,05	51,04	54,96	58,39	61,71	65,46	68,9
Глибина св.,м	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
H_B , м	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Об'єм вибірки	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	9,07	20,94	25,79	20,11	13,92	11,31	11,29	12,33	13,79	7,18
ΔT_B	год	0,1102	0,0478	0,0388	0,0497	0,0718	0,0884	0,0886	0,0811	0,0725
	хв	6,51	2,87	2,33	2,98	4,31	5,30	5,32	4,87	4,35
T_B ,хв	75,41	78,28	80,61	83,59	87,9	93,2	98,52	103,39	107,74	116,1
Глибина св.,м	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161
H_B , м	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Об'єм вибірки	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$V_{МЕХ}$, м/ГОД	8,88	10,23	10,9	11,13	10,17	10,33	14,65	18,8	20,36	14,06
ΔT_B	год	0,1126	0,0978	0,0917	0,0898	0,0983	0,0968	0,0683	0,0532	0,0491
	хв	6,76	5,87	5,50	5,39	5,9	5,81	4,10	3,19	2,95
T_B ,хв	122,86	128,73	134,23	139,62	145,52	151,33	155,43	158,62	161,57	165,84

Узагальнена таблиця 1.7.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 123-146 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
122-126	-	-	5	21	3	34,12	4,6	3,18	2,0	0,56
123-127	-	-	5	1251	3	34,12	35,4	3,18	2,0	0,08
123-128	-	-	6	2628	4	21,2	51,3	2,78	2,5	0,07
123-129	-	-	7	3098	5	16,26	55,6	2,57	3,0	0,09
123-130	-	-	8	4063	6	13,74	63,7	2,45	3,5	0,09
123-131	-	-	9	3794	7	12,25	61,6	2,36	4,0	0,12
123-132	-	-	10	1338	8	11,26	36,6	2,31	4,5	0,23
123-133	-	-	11	826	9	10,56	28,7	2,26	5,0	0,34
123-134	-	-	12	670,5	10	10,04	25,9	2,23	5,5	0,44
123-135	-	-	13	685	11	9,85	26,2	2,2	6,0	0,49
123-136	-	-	14	640	12	9,33	25,3	2,18	6,5	0,57
123-137	-	-	15	686	13	9,07	26,2	2,16	7,0	0,61
123-138	-	-	16	804	14	8,86	28,3	2,14	7,5	0,62
123-139	-	-	17	977	15	8,68	31,3	2,13	8,0	0,62
123-140	-	-	18	1180	16	8,53	34,3	2,12	8,5	0,62
123-141	-	-	19	1433	17	8,4	37,9	2,11	9,0	0,61
123-142	-	-	20	1477	18	8,28	38,4	2,1	9,5	0,65
123-143	-	-	21	1688	19	8,18	41,08	2,09	10	0,66
123-144	-	-	22	2025	20	8,1	45	2,09	10,5	0,64
123-145	0,2502	2,1831	23	2430	21	8,02	49,3	2,08	11	0,63

За табл. 1.7.2 в інтервалі заглиблення 123-145 м виділена лінійна ділянка, для якої значення 145м не являється граничним, всі умови лінійності для цього інтервалу підтверджені, тобто величину ділянки можна збільшити. При кроці дискретизації $\Delta=1$ м програма App.2 може перевірити три умови лінійності тільки для 23 пар значень T_B і H_B , враховуючи і нульові значення. Для збільшення аналізованого інтервалу заглиблення при використанні програми App.2 рекомендується використовувати різний крок дискретизації для різних інтервалів заглиблення. Для аналізованого сьомого інтервалу пропонується в діапазоні 123-145 м користуватись кроком $\Delta=2$ м, за якого буде зменшений об'єм вибірки значень T_B і H_B , а в діапазоні 145-157 м кроком $\Delta=1$ м, табл.1.7.3.

Таблиця 1.7.3 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв в інтервалі 123-145м з кроком дискретизації $\Delta=2$ м і в інтервалі 145-157 м з кроком дискретизації $\Delta=1$ м

Глибина ,м	123	125	127	129	131	133	135	137	139	141	143	145
H_B , м	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_B ,хв	0	4,99	9,58	14,68	20,61	28,72	36,69	45,6	52,35	59,54	68,92	74,23
Глибина ,м	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157
H_B , м	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Об'єм вибірки	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T_B ,хв	78,54	83,84	89,16	94,03	98,38	106,74	113,5	119,37	124,87	130,26	136,16	141,97

Узагальнена таблиця 1.7.4 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 122-154 м за даними табл. 1.7.3

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
123-146	0,2802	1,2618	13	1732	11	9,86	41,6	2,2	11,9	0,609
123-147	0,2773	1,3307	14	2049	12	9,33	45,3	2,18	12,78	0,613
123-148	0,2737	1,4217	15	2197	13	9,07	46,9	2,16	13,6	0,642
123-149	0,2701	1,5165	16	2289	14	8,86	47,8	2,14	14,4	0,699
123-150	0,2664	1,6251	17	2276	15	8,68	47,7	2,13	15,1	0,722
123-151	0,2512	1,7935	18	1925	16	8,53	43,9	2,12	15,8	0,833
123-152	0,2555	1,9898	19	1613	17	8,4	40,2	2,11	16,5	0,961
123-153	0,2502	2,1831	20	1446	18	8,28	38	2,1	17,2	1,069
123-154	0,2439	2,4160	21	1204	19	8,18	34,7	2,09	17,8	2,223

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділене жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень F_{KP} і T_{KP} .

За наведеним вище матеріалом всі три умови лінійності підтверджуються тільки в інтервалі заглиблення 123-153 м, тобто об'єм сьомої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 30 м.

За рівнянням: $H_{B.f} = 0,2502 \cdot T_B + 2,1831 = 0,2502 \cdot 119,37 + 2,1831 = 32,05 \text{ м}$.

$H_{B.f} = 0,2525 \cdot T_B + 2,0598 = 0,2525 \cdot 119,37 + 2,0598 = 32,20 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 123-153м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 32,05 \text{ м} / 1,9895 \text{ год} = 16,11 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 30 \text{ м} / 1,9895 \text{ год} = 15,08 \text{ м} / \text{год}$.

8. Формування об'єму восьмої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню восьмої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 153 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу сьомої ділянки, табл. 1.8.1.

Таблиця 1.8.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V_{MEX} , м/год	-	10,9	11,13	10,17	10,33	14,65	18,8	20,36	14,06	7,01	8,98
ΔT_B	год	0,0917	0,0898	0,0983	0,0968	0,0682	0,0532	0,0491	0,0711	0,1426	0,1114
	хв	5,5	5,39	5,9	5,81	4,09	3,19	2,95	4,27	8,56	6,68
T_B ,хв	0	5,5	10,89	16,79	22,6	26,69	29,88	32,83	37,1	45,86	52,34
Глибина св.,м	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174
H_B , м	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Об'єм вибірки	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V_{MEX} , м/год	5,66	10,86	19,1	31,9	21,87	13,15	18,08	16,01	17,42	9,07	20,94
ΔT_B	год	0,1767	0,0921	0,0524	0,0313	0,0457	0,0760	0,0553	0,0625	0,0574	0,1102
	хв	10,6	5,53	3,14	1,88	2,74	4,56	3,32	3,75	3,44	6,61
T_B ,хв	62,94	68,47	71,61	73,49	76,23	80,79	84,11	87,86	91,3	97,91	100,78

Продовження табл. 1.8.1

Глибина св.,м	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	
H_B , м	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Об'єм вибірки	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
V_{MEH} , м/ГОД	25,79	20,11	13,92	11,31	11,29	12,33	13,79	7,18	8,88	10,23	
ΔT_B	ГОД	0,0388	0,0497	0,0718	0,0884	0,0886	0,0811	0,0725	0,1393	0,1126	0,0978
	ХВ	2,33	2,98	4,31	5,30	5,32	4,87	4,35	8,36	6,76	5,86
T_B ,ХВ	103,11	106,09	110,4	115,7	121,02	125,89	130,24	138,6	145,36	151,22	

Узагальнена таблиця 1.8.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 153-175 м, крок дискретизації $\Delta=1$ м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
153-157	-	-	5	853	3	34,12	29,2	3,18	2,0	0,09
153-158	-	-	6	369	4	21,2	18,96	2,78	2,5	0,2
153-159	0,2112	-0,2264	7	272	5	16,26	16,5	2,57	3,0	0,29
153-160	-	-	8	360	6	13,74	19	2,45	3,5	0,31
153-161	-	-	9	480	7	12,25	21,9	2,36	4,0	0,33
153-162	02032	-0,0775	10	549	8	11,26	23,4	2,31	4,5	0,36
153-163	-	-	11	363,8	9	10,56	19,0	2,26	5,0	0,42
153-164	0,1878	0,1240	12	527	10	10,04	23	2,23	5,5	0,492
153-165	0,1812	0,2593	13	592	11	9,85	24,3	2,2	6,0	0,526
153-166	0,1799	0,2858	14	801	12	9,33	28,3	2,18	6,5	0,508
153-167	0,1821	0,2391	15	1013	13	9,07	31,8	2,16	7,0	0,503
153-168	0,1854	0,1634	16	1128	14	8,86	33,6	2,14	7,5	0,527
153-169	0,1883	0,0908	17	1269	15	8,68	356	2,13	8,0	0,546
153-170	0,1916	0,0056	18	1342	16	8,53	36,6	2,12	8,5	0,579
153-171	0,1948	-0,0075	19	1393	17	8,4	37,3	2,11	9,0	0,618
153-172	0,1981	0,1798	20	1432	18	8,28	37,8	2,1	9,5	0,659
153-173	0,20	-0,2412	21	1649	19	8,18	40,6	2,09	10	0,662
153-174	0,2024	-0,3201	22	1793	20	8,1	42,3	2,09	10,5	0,682
153-175	0,2053	-0,4183	23	1815	21	8,02	42,6	2,08	11	0,725

За табл. 1.8.2 в інтервалі заглиблення 153-175 м виділена лінійна ділянка, для якої значення 175м не являється граничним, всі умови лінійності для цього інтервалу підтверджені, тобто величину ділянки можна збільшити. При кроці дискретизації $\Delta=1$ м програма App.2 може перевірити три умови лінійності тільки для 23 пар значень T_B і H_B , враховуючи і нульові значення. Для збільшення аналізованого інтервалу заглиблення при використанні програми App.2 рекомендується використовувати різний крок дискретизації для різних інтервалів заглиблення. Для аналізованого восьмого інтервалу пропонується в діапазоні 153-175м користуватись кроком $\Delta=2$ м, за якого буде зменшений об'єм вибірки значень T_B і H_B , а в діапазоні 175-184 м кроком $\Delta=1$ м, табл. 1.8.3.

Таблиця 1.8.3 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв в інтервалі 153-175 м з кроком дискретизації $\Delta=2$ м і в інтервалі 175-184 м з кроком дискретизації $\Delta=1$ м

Глибина,м	153	155	157	159	161	163	165	167	169	171	173	175
H_B , м	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_B ,хв	0	10,89	22,6	29,88	37,1	52,34	68,47	73,49	80,79	87,86	97,71	103,11

Продовження табл. 1.8.3

Глибина, м	176	177	178	179	180	181	182	183	184
H_B , м	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Об'єм вибірки	13	14	15	16	17	18	19	20	21
T_B , хв	106,09	110,4	115,7	121,02	125,89	130,24	138,6	145,36	151,22

Узагальнена таблиця 1.8.4 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 153-184 м за даними табл. 1.8.3

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
153-176	0,2102	-0,05349	12	961	11	9,85	31	2,2	11,9	0,82
153-177	0,2136	-0,6582	14	1061	12	9,33	32,6	2,18	12,8	0,85
153-178	0,2159	-0,7433	15	1246	13	9,07	35,3	2,16	13,6	0,85
153-179	0,2172	0,7981	16	1494	14	8,86	38,6	2,14	14,4	0,83
153-180	0,2181	-0,8374	17	1786	15	8,68	42,3	2,13	15,1	0,81
153-181	0,2189	-0,8733	18	2111	16	8,53	45,9	2,12	15,8	0,8
153-182	0,2181	-0,8321	19	2460	17	8,4	49,6	2,11	16,5	0,78
153-183	0,2166	-0,7554	20	2729	18	8,28	52,2	2,1	17,2	0,78
153-184	0,2085	-0,1565	21	1567	19	8,18	38,5	2,09	17,8	2,13

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділене жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень F_{KP} і T_{KP} .

За табл. 1.8.4 всі три умови лінійності підтверджуються в інтервалі заглиблення 153-183 м, тобто повний об'єм восьмої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 30 м.

За рівнянням: $H_{B,f} = 0,2166 \cdot T_B - 0,7554 = 0,2166 \cdot 145,36 - 0,7554 = 30,73 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 153-183 м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEH,f} = H_{B,f} / T_B = 30,73 \text{ м} / 2,4227 \text{ год} = 12,68 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEH} = H_B / T_B = 30 \text{ м} / 2,4227 \text{ год} = 12,38 \text{ м} / \text{год}$.

9. Формування об'єму дев'ятої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню дев'ятої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 183 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу восьмої ділянки, табл. 1.9.1.

Таблиця 1.9.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
V_{MEH} , м/год	-	10,23	10,9	11,13	10,17	10,33	14,65	18,8	20,36	14,06	7,01
ΔT_B	год	0	0,0978	0,0917	0,0898	0,0983	0,0968	0,0682	0,0532	0,0491	0,0711
	хв	0	5,87	5,5	5,39	5,90	5,81	4,09	3,19	2,95	4,27
T_B ,хв	0	5,87	11,37	16,76	22,66	28,47	32,56	35,75	38,7	42,97	51,53
Глибина св.,м	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204
H_B , м	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Об'єм вибірки	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V_{MEH} , м/год	8,98	5,66	10,86	19,1	31,9	21,87	13,15	22,56	22,56	15,65	11,78
ΔT_B	год	0,1114	0,1767	0,0921	0,0524	0,0313	0,0457	0,0760	0,0443	0,0443	0,0639
	хв	6,68	10,6	5,53	3,14	1,88	2,74	4,56	2,66	2,66	3,83
T_B ,хв	58,21	68,81	74,34	77,48	79,36	82,1	86,66	89,32	91,98	95,81	100,9

Продовження табл. 1.9.1

Глибина св.,м	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214
H_B , м	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Об'єм вибірки	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
V_{MEH} , м/год	5,87	11,38	11,52	14,59	25,03	24,86	27,69	20,4	11,3	8,42
ΔT_B	год	0,1704	0,0879	0,0868	0,0685	0,040	0,0402	0,0361	0,0490	0,0885
	хв	10,22	5,27	5,21	4,11	2,4	2,41	2,17	2,94	5,31
T_B ,хв	111,12	116,39	121,6	125,71	128,11	130,52	132,69	135,63	140,94	148,07

Узагальнена таблиця 1.9.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 153-175 м, крок дискретизації $\Delta=1$ м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
183-187	0,1778	-0,0155	5	19427	3	34,12	29,2	3,18	2,0	0,025
183-188	0,1766	-0,0061	6	19420	4	21,2	18,96	2,78	2,5	0,027
183-189	0,1813	-0,0491	7	3464	5	16,26	16,5	2,57	3,0	0,08
183-190	0,1894	-0,1329	8	1023	6	13,74	19	2,45	3,5	0,187
183-191	0,1987	-0,2416	9	603	7	12,25	21,9	2,36	4,0	0,293
183-192	0,2058	-0,03387	10	628	8	11,26	23,4	2,31	4,5	0,339
183-193	0,2032	-0,2598	11	904	9	10,56	19,0	2,26	5,0	0,329
183-194	0,1988	-0,2141	12	1110	10	10,04	23	2,23	5,5	0,341
183-195	0,1881	0,0140	13	735	11	9,85	24,3	2,2	6,0	0,473
183-196	0,1823	0,1464	14	796	12	9,33	28,3	2,18	6,5	0,51
183-197	0,181	0,1753	15	1047	13	9,07	31,8	2,16	7,0	0,495
183-198	0,1828	0,1332	16	1308	14	8,86	33,6	2,14	7,5	0,49
183-199	0,1857	0,0603	17	1443	15	8,68	356	2,13	8,0	0,512
183-200	0,1883	-0,0101	18	1603	16	8,53	36,6	2,12	8,5	0,531
183-201	0,1915	-0,1014	19	1605	17	8,4	37,3	2,11	9,0	0,576
183-202	0,1952	-0,208	20	1508	18	8,28	37,8	2,1	9,5	0,642
183-203	0,1986	-0,3146	21	1476	19	8,18	40,6	2,09	10	0,7
183-204	0,2014	-0,4065	22	1564	20	8,1	42,3	2,09	10,5	0,73
183-205	0,2014	-0,409	23	1880	21	8,02	42,6	2,08	11	0,713

За табл.1.9.2 в інтервалі заглиблення 183-205 м виділена лінійна ділянка, для якої значення 205 м не являється граничним, всі умови лінійності для цього інтервалу підтверджені, тобто величину ділянки можна збільшити. При кроці дискретизації $\Delta=1$ м програма App.2 може перевірити три умови лінійності тільки для 23 пар значень T_B і H_B , враховуючи і нульові значення. Для збільшення аналізованого інтервалу заглиблення при використанні програми App.2 рекомендується використовувати різний крок дискретизації для різних інтервалів заглиблення. Для аналізованого дев'ятого інтервалу пропонується в діапазоні 183-205 м користуватись кроком $\Delta=2$ м, за якого буде зменшений об'єм вибірки значень T_B і H_B , а в діапазоні 205-214 м кроком $\Delta=1$ м, табл.1.9.3.

Таблиця 1.9.3 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв в інтервалі 183-205м з кроком дискретизації $\Delta=2$ м і в інтервалі 205-214 м з кроком дискретизації $\Delta=1$ м

Глибина,м	183	185	187	189	191	193	195	197	199	201	203	205
H_B , м	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_B ,хв	0	11,37	22,66	32,56	38,7	51,53	68,81	77,48	82,1	89,32	95,81	111,12

Продовження табл. 1.9.3

Глибина,м	206	207	208	209	210	211	212	213	214
H_B , м	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Об'єм вибірки	13	14	15	16	17	18	19	20	21
T_B ,хв	116,39	121,6	125,71	128,11	130,52	132,69	135,63	140,94	148,07

Узагальнена таблиця 1.9.4 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 153-184 м за даними табл. 1.9.3

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
183-206	0,20	-0,3626	13	1389	11	9,85	37,3	2,2	11,9	0,68
183-207	0,2004	-0,3753	14	1808	12	9,33	42,5	2,18	12,8	0,65
183-208	0,2008	-0,3928	15	2274	13	9,07	47,7	2,16	13,6	0,63
183-209	0,2022	-0,4489	16	2637	14	8,86	51,4	2,14	14,4	0,63
183-210	0,2038	-0,5241	17	2720	15	8,68	52,2	2,13	15,1	0,66
183-211	0,2063	-0,6338	18	2609	16	8,53	51,1	2,12	15,8	0,72
183-212	0,2087	-0,7455	19	2430	17	8,4	49,3	2,11	16,5	0,78
183-213	0,2106	-0,8378	20	2504	18	8,28	50	2,1	17,2	0,81
183-214	0,2207	-0,8673	21	2349	19	8,18	48,3	2,09	17,8	1,98

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділене жирним шрифтом. В табл. п' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень F_{KP} і T_{KP} .

За табл. 1.9.4 всі три умови лінійності підтверджуються в інтервалі заглиблення 183-213 м, тобто повний об'єм дев'ятої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 30 м.

За рівнянням: $H_{B,f} = 0,2106 \cdot T_B - 0,8378 = 0,2106 \cdot 140,94 - 0,8378 = 28,84 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 183...183м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 28,84 \text{ м} / 2,349 \text{ год} = 12,28 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 30 \text{ м} / 2,349 \text{ год} = 12,77 \text{ м} / \text{год}$.

10. Формування об'єму десятої вибірки пар значень H_B і T_B

Формування мінімального об'єму по виділенню десятої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 213 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу дев'ятої ділянки, табл. 1.10.1.

Таблиця 1.10.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Глибина св.,м	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEX} , м/год	-	8,42	7,08	5,79	7,34	11,9	11,55	14,58	17,92	21,15	29,54
ΔT_B	год	0	0,1188	0,1412	0,1727	0,1362	0,0840	0,0866	0,0686	0,0558	0,0473
	хв	0	7,13	8,47	10,36	8,17	5,04	5,20	4,12	3,35	2,84
T_B ,хв	0	7,13	15,6	25,96	34,13	39,17	44,37	48,49	51,84	54,68	56,71

Узагальнена таблиця 1.10.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 213-122 м за даними табл. 1.10.1

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
213-217	0,1144	0,1053	5	844	3	34,12	29	3,18	2,0	0,094
213-218	0,121	0,0408	6	549	4	21,2	23,4	2,78	2,5	0,159
213-219	0,1282	-0,0475	7	409	5	16,26	20,2	2,57	3,0	0,237
213-220	0,1363	-0,1612	8	311	6	13,74	17,6	2,45	3,5	0,337
213-221	0,1451	-0,2993	9	248	7	12,25	15,8	2,36	4,0	0,454
213-222	0,1543	-0,4543	10	209	8	11,26	14,4	2,31	4,5	0,581

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділені жирним шрифтом. В табл. п' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень $F_{кр}$ і $T_{кр}$.

За табл. 1.10.2 всі три умови лінійності підтверджуються в інтервалі заглиблення 213-220 м, тобто повний об'єм десятої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 7 м.

За рівнянням: $H_{Б.ф} = 0,1363 \cdot T_{Б} - 0,1612 = 0,1363 \cdot 48,49 - 0,1612 = 6,45 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 213-220м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{Мех.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 6,45 \text{ м} / 0,8082 \text{ год} = 7,98 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{Мех} = H_{Б} / T_{Б} = 7 \text{ м} / 0,8082 \text{ год} = 8,66 \text{ м} / \text{год}$.

11. Формування об'єму одинадцятої вибірки пар значень $H_{Б}$ і $T_{Б}$

Формування мінімального об'єму по виділенню одинадцятої лінійної ділянки починається із заглиблення свердловини 220 м, яке одночасно є кінцевим значенням виділеного інтервалу десятої ділянки, табл. 1.11.1.

Таблиця 1.11.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв

Глибина св.,м	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$V_{Мех}$, м/год	-	17,92	21,15	29,54	9,76	10,6	12,12	10,57	11,03	14,65	15,81
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0558	0,0473	0,0338	0,1024	0,0943	0,0825	0,0946	0,0907	0,0682
	хв	0	3,35	2,84	2,03	6,14	5,66	4,95	5,68	5,44	4,09
$T_{Б}$,хв	0	3,35	6,19	8,22	14,36	20,02	24,97	30,65	36,09	40,18	43,97
Глибина св.,м	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241
$H_{Б}$, м	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Об'єм вибірки	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$V_{Мех}$, м/год	11,23	17,67	50,06	39,03	8,36	7,68	5,98	7,92	8,64	9,51	19,27
$\Delta T_{Б}$	год	0,0890	0,0566	0,020	0,0256	0,1196	0,1302	0,1672	0,1263	0,1157	0,1052
	хв	5,34	3,4	1,2	1,54	7,18	7,81	10,03	7,58	6,94	6,31
$T_{Б}$,хв	49,31	52,71	53,91	55,45	63,26	71,07	81,1	88,68	95,62	101,93	105,04
Глибина св.,м	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
$H_{Б}$, м	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Об'єм вибірки	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
$V_{Мех}$, м/год	18,41	17,0	17,16	12,78	17,15	13,59	12,58	7,23	13,69	9,97	21,2
$\Delta T_{Б}$	год	0,0543	0,0588	0,0583	0,0782	0,0583	0,0738	0,0795	0,1383	0,0730	0,1003
	хв	3,26	3,53	3,5	4,69	3,5	4,42	4,77	8,3	4,38	6,02
$T_{Б}$,хв	108,3	111,83	115,33	120,02	123,52	127,94	132,71	141,01	145,39	151,41	154,24

Узагальнена таблиця 1.11.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 220-245 м, крок дискретизації $\Delta=1$ м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	$F_{кр}$ $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	$T_{кр}$ $\alpha=0,05$	$\bar{H}_{Б}$	σ_0
220-224	0,2871	0,1554	5	81,6	3	34,12	29,2	3,18	2,0	0,298
221-225	0,2301	0,3714	5	63,9	3	34,12	18,96	2,78	2,0	0,335
222-226	0,1988	0,2979	5	157	3	34,12	16,5	2,57	2,0	0,216
223-227	0,180	-0,057	5	2455	3	34,12	19	2,45	2,0	0,055

Продовження узагальненої табл. 1.11.2

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
223-228	0,181	-0,0646	6	5410	4	21,2	73,6	2,78	2,5	0,051
223-229	0,1862	-0,1124	7	2508	5	16,26	50,1	2,57	3,0	0,096
223-230	0,1929	-0,1836	8	1373	6	13,74	37	2,45	3,5	0,162
223-231	0,1961	-0,224	9	1872	7	12,25	43,3	2,36	4,0	0,167
223-232	0,2012	-0,2947	10	1673	8	11,26	40,9	2,31	4,5	0,209
223-233	0,210	-0,424	11	754	9	10,56	27,4	2,26	5,0	0,36
223-234	0,2202	-0,5809	12	457	10	10,04	21,4	2,23	5,5	0,527
223-235	0,2244	-0,658	13	591	11	9,85	24,3	2,2	6,0	0,526
223-236	0,2223	-0,6144	14	793	12	9,33	28,2	2,18	6,5	0,511
223-237	0,2133	-0,398	15	734	13	9,07	27,1	2,16	7,0	0,59
223-238	0,2046	-0,1741	16	689	14	8,86	26,2	2,14	7,5	0,672
223-239	0,1974	0,0224	17	696	15	8,68	26,4	2,13	8,0	0,733
223-240	0,1919	0,1819	18	750	16	8,53	27,4	2,12	8,5	0,772
223-241	0,1898	0,2442	19	910	17	8,4	30,2	2,11	9,0	0,762
223-242	0,1875	0,3206	20	1066	18	8,28	32,6	2,1	9,5	0,762
223-243	0,1868	0,3418	21	1308	19	8,18	36,2	2,09	10	0,742
223-244	0,1865	0,3504	22	1585	20	8,1	39,8	2,09	10,5	0,725
223-245	0,187	0,3322	23	1895	21	8,02	43,5	2,08	11	0,71

За табл. 1.11.2 в інтервалі заглиблення 223-245 м виділена лінійна ділянка, для якої значення 245 м не являється граничним, всі умови лінійності для цього інтервалу підтверджені, тобто величину ділянки можна збільшити. При кроці дискретизації $\Delta=1$ м програма App.2 може перевірити три умови лінійності тільки для 23 пар значень T_B і H_B , враховуючи і нульові значення. Для збільшення аналізованого інтервалу заглиблення при використанні програми App.2 рекомендується використовувати різний крок дискретизації для різних інтервалів заглиблення. Для аналізованого дев'ятого інтервалу пропонується в діапазоні 223-245 м користуватись кроком $\Delta=2$ м, за якого буде зменшений об'єм вибірки значень T_B і H_B , а в діапазоні 245-254 м кроком $\Delta=1$ м, табл. 1.11.3.

Таблиця 1.11.3 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв в інтервалі 223-245м з кроком дискретизації $\Delta=2$ м і в інтервалі 245-255 м з кроком дискретизації $\Delta=1$ м

Глибина, м	223	225	227	229	231	233	235	337	239	241	243	245
H_B , м	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Об'єм вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_B , хв	0	11,8	22,43	31,98	41,11	45,71	54,43	72,27	89,79	96,21	103	111,9
Глибина, м	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	
H_B , м	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Об'єм вибірки	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
T_B , хв	114,69	119,11	123,88	132,18	136,56	142,58	145,41	148,66	151,61	156,94	160,87	

Узагальнена таблиця 1.11.4 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 223-255 м за даними табл. 1.9.3

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
223-246	0,1942	0,0505	13	1137	11	9,85	33,7	2,2	11,9	0,750
223-247	0,1963	-0,0236	14	1235	12	9,33	37,1	2,18	12,8	0,748
223-248	0,1978	-0,0845	15	1642	13	9,07	40,5	2,16	13,6	0,741

Узагальнена таблиця 1.11.4 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 223-255 м за даними табл. 1.11.3

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	n'	F_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,05$	$\bar{H}_B$	σ_0
223-249	0,1977	-0,0788	16	2031	14	8,86	45,1	2,14	14,4	0,72
223-250	0,1978	-0,0855	17	2466	15	8,68	49,7	2,13	15,1	0,69
223-251	0,1976	-0,0755	18	2952	16	8,53	54,3	2,12	15,8	0,67
223-252	0,1981	-0,1008	19	3454	17	8,4	58,8	2,11	16,5	0,66
223-253	0,1990	-0,1463	20	3876	18	8,28	62,3	2,1	17,2	0,66
223-254	0,2145	-0,8675	21	2843	19	8,18	56,4	2,09	17,8	1,98
223-255	0,2083	-0,3566	22	2156	20	8,1	52,6	2,09	18,4	2,08

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень критичних значень F_{KP} і T_{KP} .

За табл. 1.11.4 всі три умови лінійності підтверджуються в інтервалі заглиблення 223-253 м, тобто повний об'єм одинадцятої лінійної ділянки, виділеної в цьому інтервалі, рівний 30 м.

За рівнянням: $H_{B.f} = 0,199 \cdot T_B - 0,1463 = 0,199 \cdot 148,66 - 0,1463 = 29,43 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі 223-253м: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 29,43 \text{ м} / 2,4777 \text{ год} = 11,88 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 30 \text{ м} / 2,4777 \text{ год} = 12,11 \text{ м} / \text{год}$.

Другий етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська - 104 при відсутності розподілу діапазону поглиблення на інтервали геологічних досліджень". Визначення статистичних характеристик вибірок дискретних значень технологічних параметрів буріння: механічної швидкості, осьового навантаження на долото, частоти обертання долота і обертового моменту ротора, для виділених лінійних ділянок

На першому етапі "Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини" в інтервалі заглиблення свердловини 33-253 м було виділено одинадцять лінійних ділянок, для яких функціональна залежність $H_B = f(T_B)$ представлена емпіричним рівнянням лінійної регресії.

В табл. 2.1 наведено рівняння регресії залежності лінійних ділянок і середні значення механічної швидкості для цих ділянок за рівнянням регресії і за інтервалом заглиблення свердловини.

Таблиця 2.1 – Рівняння регресії залежності лінійних ділянок та середні значення механічної швидкості за рівнянням регресії і за інтервалом заглиблення свердловини.

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	Інтервал заглиблення, м	Рівняння лінійної регресії	$\bar{V}_{mex}, \text{ м} / \text{год}$	
			За рівнянням	За заглибленням
ЛД.1	37-43	$H_{B.f} = 0,4521 \cdot T_B - 0,1095$	26,6	28,5
ЛД.2	47-54	$H_{B.f} = 0,1727 \cdot T_B + 0,278$	10,82	11,58
ЛД.3	58-62	$H_{B.f} = 0,2571 \cdot T_B + 0,2283$	16,32	15,66
ЛД.4	63-85	$H_{B.f} = 0,2789 \cdot T_B + 1,3336$	17,81	17,76
ЛД.5	85-107	$H_{B.f} = 0,1799 \cdot T_B + 0,2139$	10,9	11,12
ЛД.6	118-122	$H_{B.f} = 0,2569 \cdot T_B + 0,2287$	16,31	15,64
ЛД.7	123-153	$H_{B.f} = 0,2439 \cdot T_B + 2,416$	15,79	15,08

Продовження табл. 2.1

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	Інтервал заглиблення, м	Рівняння лінійної регресії	$\bar{V}_{мех}, м / год$	
			За рівнянням	За заглибленням
ЛД.8	153-83	$H_{Б.ф} = 0,2166 \cdot T_{Б} - 0,7554$	12,68	12,38
ЛД.9	183-213	$H_{Б.ф} = 0,2106 \cdot T_{Б} - 0,8378$	12,28	12,77
ЛД.10	213-220	$H_{Б.ф} = 0,1363 \cdot T_{Б} - 0,1612$	7,98	8,66
ЛД.11	223-253	$H_{Б.ф} = 0,199 \cdot T_{Б} - 0,1463$	11,88	12,11

В табл. 2.2 наведені дискретні значення вибірок $V_{мех.i}$, $F_{ДОЛ}$, n_d і T_P для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованого інтервалу заглиблення свердловини.

Таблиця 2.2 – Дискретні значення вибірок $V_{мех.i}$, $F_{ДОЛ}$, n_d і T_P для однорідних лінійних ділянок

Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення, м	ЛД.1 – 37-43м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 28,5
$V_{мех.i}, м / год$	25,28; 30,68; 15,98; 40,86; 36,66; 41,61 - n=6
$F_{ДОЛ.i}, тс$	0,49; 0,99; 0,78; 1,03; 1,39; 0,89 - n=6
$n_{d.i}, хв^{-1}$	42,0; 44,16; 46,32; 46,08; 44,4; 45,12 - n=6
$T_P, кН \cdot м$	3,69; 7,32; 5,68; 6,84; 6,99; 5,95 - n=6
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення, м	ЛД.2 – 47-54м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 11,58
$V_{мех.i}, м / год$	20,48; 9,23; 10,15; 9,85; 8,92; 8,0; 98,32 - n=7
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,0; 1,08; 1,16; 1,18; 1,19; 1,2; 1,21 - n=7
$n_{d.i}, хв^{-1}$	29,17; 29,17; 29,17; 29,91; 29,17; 29,17; 29,54 - n=7
$T_P, кН \cdot м$	3,1; 3,79; 0,92; 0,97; 1,03; 1,09; 1,14 - n=7
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення, м	ЛД.3 – 58-62м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 15,66
$V_{мех.i}, м / год$	22,27; 17,75; 13,97; 12,07 - n=4
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,27; 1,29; 1,3; 1,87 - n=4
$n_{d.i}, хв^{-1}$	31,38; 32,12; 32,12; 32,49 - n=4
$T_P, кН \cdot м$	1,43; 1,49; 1,54; 1,6 - n=4
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення, м	ЛД.4 – 63-85м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 17,76
$V_{мех.i}, м / год$	21,11; 27,91; 27,11; 25,18; 26,82; 20,97; 23,5; 17,81; 14,97; 14,64; 14,25; 15,96; 12,02; 15,28; 17,51; 18,08; 16,01; 17,42; 9,07; 20,94; 25,79; 20,11 - n=22

Продовження табл. 2.2

$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	2,21; 1,69; 1,56; 1,36; 1,33; 0,99; 1,64; 2,29; 1,84; 1,87; 1,89; 1,84; 2,52; 0,99; 1,47; 2,83; 2,01; 1,44; 1,66; 1,57; 1,47; 1,33 - n=22
$n_{\text{д.і}}, \text{хв}^{-1}$	32,49; 38,89; 38,89; 38,15; 38,15; 38,15; 38,15; 38,89; 40,0; 41,11; 42,22; 42,96; 42,96; 42,96; 42,96; 42,96; 42,96; 42,96; 42,22; 41,48; 39,63 - n=22
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	1,66; 1,77; 1,83; 1,89; 1,95; 2,0; 2,06; 2,12; 2,17; 2,23; 2,29; 2,35; 2,4; 2,46; 2,52; 2,57; 2,63; 2,69; 2,75; 2,8; 2,86; 2,55 - n=22
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.5 – 85-107м
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 11,12
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	13,92; 11,31; 11,29; 12,33; 13,79; 7,18; 8,88; 10,23; 10,9; 11,13; 10,17; 10,33; 14,65; 18,8; 20,36; 14,06; 7,01; 8,98; 5,66; 10,86; 19,1; 31,9 - n=22
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	1,07; 1,41; 0,82; 1,01; 0,85; 1,13; 1,24; 0,79; 1,36; 1,47; 1,5; 1,3; 1,73; 1,07; 2,03; 1,64; 1,84; 1,5; 1,16; 1,18; 1,19; 1,2 - n=22
$n_{\text{д.і}}, \text{хв}^{-1}$	38,52; 37,41; 37,04; 37,04; 37,04; 37,04; 37,04; 37,78; 38,52; 39,63; 41,11; 42,59; 43,7; 45,19; 45,56; 45,56; 45,56; 45,19; 42,96; 40,74; 38,15; 34,07 - n=22
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	2,98; 3,03; 3,09; 3,15; 3,2; 3,26; 3,32; 3,38; 3,43; 3,49; 3,55; 3,6; 3,66; 3,72; 3,78; 3,83; 3,89; 3,95; 4,0; 4,06; 4,12; 4,18 - n=22
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.6 – 118-122м
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 15,64
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	22,27; 17,75; 13,97; 12,07 - n=4
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	1,69; 1,56; 1,36; 1,33 - n=4
$n_{\text{д.і}}, \text{хв}^{-1}$	41,85; 43,7; 45,56; 46,3 - n=4
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	4,86; 4,92; 4,98; 5,03 - n=4
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.7 – 123-153м
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 11,53
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	21,11; 27,91; 27,11; 25,18; 26,82; 20,97; 23,5; 17,81; 14,97; 14,64; 14,25; 15,96; 12,02; 15,28; 17,51; 18,08; 16,01; 17,42; 9,07; 20,94; 25,79; 20,11; 13,92; 11,31; 11,29; 12,33; 13,79; 7,18; 8,88; 10,23 - n=30
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	1,64; 2,29; 1,84; 1,87; 1,89; 1,84; 2,52; 0,99; 1,47; 2,83; 2,01; 1,44; 1,66; 1,57; 1,47; 1,33; 1,07; 1,41; 0,82; 1,01; 0,85; 1,13; 1,24; 0,79; 1,36; 1,47; 1,5; 1,3; 1,73; 1,07 - n=30
$n_{\text{д.і}}, \text{хв}^{-1}$	45,93; 44,81; 44,07; 42,96; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 42,59; 43,33; 44,44; 44,81; 42,0; 41,28; 42,72; 46,56; 45,36; 45,6; 44,4; 46,8; 44,28; 41,76; 45,12; 44,52; 43,92 - n=30
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	5,15; 5,21; 5,26; 5,32; 5,38; 5,44; 5,49; 5,55; 5,61; 5,66; 5,72; 5,78; 5,84; 5,89; 5,95; 6,01; 6,06; 6,57; 7,0; 7,29; 4,03; 4,04; 5,1; 7,11; 7,18; 7,24; 7,364; 6,28; 6,64; 7,01 - n=30

Продовження табл. 2.2

Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.8 – 153-183м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 12,38
$V_{мех.i}, м / год$	10,9; 11,13; 10,17; 10,33; 14,65; 18,8; 20,36; 14,06; 7,01; 8,98; 5,66; 10,86; 19,1; 31,9; 21,87; 13,15; 18,08; 16,01; 17,42; 9,07; 20,94; 25,79; 20,11; 13,92; 11,31; 11,29; 12,33; 13,79; 7,18; 8,88 - n=30
$F_{дол.i}, тс$	2,03; 1,64; 1,84; 1,5; 2,83; 2,01; 1,44; 1,66; 1,57; 1,47; 1,33; 1,07; 1,41; 0,82; 1,01; 0,85; 1,13; 1,24; 0,79; 1,36; 1,47; 1,5; 1,3; 1,73; 1,07; 2,03; 1,64; 1,84; 1,5; 1,5 - n=30
$n_{d.i}, хв^{-1}$	44,64; 46,8; 48,24; 47,52; 44,64; 48,0; 46,56; 47,04; 46,32; 45,6; 45,84; 43,92; 46,32; 46,08; 45,36; 46,08; 45,84; 45,6; 45,6; 50,16; 49,68; 49,68; 49,92; 49,92; 49,92; 47,76; 48,48; 48,0; 43,2; 45,12 - n=30
$T_R, кН·м$	7,28; 6,89; 6,1; 7,03; 7,2; 6,88; 5,49; 6,98; 7,14; 7,29; 5,19; 7,43; 3,26; 4,89; 6,44; 3,19; 3,69; 6,37; 3,47; 5,51; 3,82; 4,29; 5,7; 4,67; 2,62; 7,22; 7,19; 7,26; 6,72; 5,08 - n=30
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.9 – 183-213м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 12,77
$V_{мех.i}, м / год$	10,23; 10,9; 11,13; 10,17; 10,33; 14,65; 18,8; 20,36; 14,06; 7,01; 8,98; 5,66; 10,86; 19,1; 31,9; 21,87; 13,15; 22,56; 22,56; 15,65; 11,78; 5,87; 11,38; 11,52; 14,59; 25,03; 24,86; 27,69; 20,4; 11,3 - n=30
$F_{дол.i}, тс$	1,51; 1,53; 1,36; 1,33; 2,15; 1,96; 1,73; 1,73; 1,92; 2,03; 2,43; 2,15; 1,47; 1,67; 1,92; 1,67; 1,98; 1,58; 1,58; 1,35; 1,73; 2,03; 1,76; 1,73; 2,54; 2,72; 2,94; 1,67; 2,57; 1,86 - n=30
$n_{d.i}, хв^{-1}$	46,56; 48,0; 50,88; 51,36; 51,6; 49,44; 48,48; 49,92; 47,52; 47,28; 46,56; 46,56; 46,56; 47,04; 47,28; 46,8; 46,8; 43,44; 43,44; 43,2; 43,68; 43,44; 41,76; 41,76; 38,16; 35,28; 41,76; 48,0; 44,16; 45,84 - n=30
$T_R, кН·м$	6,2; 7,31; 6,66; 3,96; 4,56; 6,49; 7,27; 7,13; 3,13; 5,6; 3,14; 3,97; 6,03; 4,76; 4,85; 3,72; 4,48; 6,22; 6,22; 7,12; 5,24; 3,57; 4,89; 6,87; 7,26; 7,24; 7,27; 3,9; 5,92; 5,05 - n=30
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.10 – 213-220м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 8,66
$V_{мех.i}, м / год$	8,42; 7,08; 5,79; 7,34; 11,9; 11,55; 14,58 - n=7
$F_{дол.i}, тс$	1,47; 1,41; 1,7; 1,53; 1,64; 1,73; 2,06 - n=7
$n_{d.i}, хв^{-1}$	44,88; 45,6; 44,64; 45,36; 45,12; 45,36; 45,36 - n=7
$T_R, кН·м$	4,53; 5,33; 7,19; 2,78; 5,53; 2,81; 4,02 - n=7
Порядковий номер лінійної ділянки і інтервал заглиблення,м	ЛД.11 – 223-253м
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 12,11
$V_{мех.i}, м / год$	9,76; 10,6; 12,12; 10,57; 11,03; 14,65; 15,81; 11,23; 17,67; 50,06; 39,03; 8,36; 7,68; 5,98; 7,92; 8,64; 9,51; 19,27; 18,41; 17,0; 17,16; 12,78; 17,15; 13,59; 12,58; 7,23; 13,69; 9,97; 21,2; 18,48 - n=30
$F_{дол.i}, тс$	1,61; 1,41; 1,55; 1,81; 1,61; 1,61; 1,55; 1,44; 1,84; 1,3; 2,24; 2,27; 2,21; 1,98; 1,38; 2,24; 1,78; 1,76; 1,84; 1,32; 1,38; 1,2; 1,57; 1,86; 1,35; 1,65; 1,48; 1,8; 1,4; 1,91 - n=30

Продовження табл. 2.2

$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	47,76; 47,28; 48,24; 47,04; 46,32; 46,56; 46,56; 44,16; 44,16; 42,96; 43,68; 41,04; 43,44; 41,76; 42,48; 39,36; 43,92; 45,84; 42,0; 51,12; 50,88; 49,92; 51,36; 50,64; 51,6; 50,64; 42,48; 40,32; 42,24; 41,28 - n=30
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	3,58; 3,15; 2,71; 4,04; 5,42; 4,9; 7,26; 6,51; 7,26; 6,99; 7,12; 7,26; 5,6; 7,13; 4,23; 7,24; 6,74; 4,64; 7,25; 5,13; 3,67; 7,25; 4,7; 5,22; 2,82; 3,49; 5,91; 7,03; 3,15; 5,43 - n=30

Таблиця 2.3 – Статистичні характеристики вибірок механічної швидкості виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення $\bar{V}_{MEX}$ за заглибленням свердловини

Порядковий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX},$ $\text{м} / \text{год}$ За загл.	$\bar{V}_{MEX},$ $\text{м} / \text{год}$	$D_V,$ $(\text{м} / \text{год})^2$	$\sigma_V,$ $\text{м} / \text{год}$	$R_V,$ %
ЛД.10	8,66	9,52	10,203	3,1942	33,5
ЛД.5	11,12	12,86	32,6372	5,71	44,4
ЛД.2	11,58	23,56	1104,688	33,2368	141
ЛД.11	12,11	14,97	83,2017	9,1215	60,9
ЛД.8	12,38	14,50	35,7324	5,9777	41,2
ЛД.9	12,77	15,48	45,8631	6,7722	43,8
ЛД.7	15,08	17,05	34,0993	5,0993	29,9
ЛД.6	15,64	16,52	20,2934	4,5048	27,3
ЛД.3	15,66	16,52	20,2934	4,5048	27,3
ЛД.4	17,76	19,20	27,02	5,20	27,1
ЛД.1	28,5	31,84	99,1929	9,9596	31,3

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень механічної швидкості буріння керуватись положеннями методики згідно якої 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 цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$, то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки. За табл. 2.3, з урахуванням сказаного вище, перевірка на наявність артефактів проводиться для всіх вибірок значень швидкості.

Таблиця 2.4 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX},$ n	σ_V	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta,$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX},$ n'	D'_V	σ'_V	$R_V,$ %
ЛД.10	9,52; 7	3,1942	1,94 $\alpha=0,1$	6,620	2,9-16,14 Арт. відс.	-	-	-	33,5
ЛД.5	12,8; 22	5,71	1,72 $\alpha=0,1$	10,04	2,82-22,9 Арт. 31,9	11,95; 21	15,2726	3,908	32,7
ЛД.8	14,5; 30	5,9777	3,4* $\alpha=0,002$	20,66	-6,16-35,16* Арт. відс.	-	-	-	41,2
ЛД.11	14,97; 30	9,1215	3,66* $\alpha=0,001$	35,4	-20,43-50,37* Арт. відс.	-	-	-	60,9
ЛД.9	15,48; 30	6,77	2,46* $\alpha=0,02$	16,93	-1,45-32,41* Арт. відс.	-	-	-	43,8
ЛД.7	17,05; 30	5,1	2,46* $\alpha=0,02$	12,75	4,3-29,8* Арт. відс.	-	-	-	29,9
ЛД.6	16,52; 4	4,5048	2,35 $\alpha=0,1$	11,82	4,7-28,34* Арт. відс.	-	-	-	27,3

Продовження табл. 2.4

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX}; n$	σ_V	ткр і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta, \bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX}; n'$	D'_V	σ'_V	$R_V, \%$
ЛД.3	16,52; 4	4,5048	2,35 $\alpha=0,1$	11,82	4,7-28,34 Арт. відс.	-	-	-	27,3
ЛД.4	19,20; 22	5,20	2,08* $\alpha=0,05$	11,06	8,14-30,26* Арт. відс.	-	-	-	27,1
ЛД.2	23,56; 7	33,24	1,94 $\alpha=0,1$	68,96	-45,35-92,5 Арт. 98,32	11,10; 6	21,6617	4,6542	41,9
ЛД.1	31,84; 6	9,96	2,01 $\alpha=0,1$	21,62	10,22-53,46 Арт. відс.	-	-	-	31,3

Прим: $\bar{V}'_{MEX}$, D'_V , σ'_V , n' – статистичні характеристики і об'єм вибірок механічної швидкості без артефактів, виділені в таблиці жирним шрифтом.

Для вибірок дискретних значень механічної швидкості за ЛД.8, ЛД.11, ЛД.9, ЛД.7 і ЛД.14 артефакти, визначені за рівня значущості $\alpha=0,1$, знаходяться всередині лінійної ділянки і їх виділення приведе до ліквідації цієї ділянки, лінійність якої підтверджена. Підтвердження цих артефактів або їх відхилення проводилось за рівнем значущості, величина якого в табл.2.4 позначено зірочкою.

Таблиця 2.5 – Статистичні характеристики вибірок частоти обертання долота $n_{d,i}, x\text{в}^{-1}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{n}_d, x\text{в}^{-1}$	$D_n, (x\text{в}^{-1})^2$	$\sigma_n, x\text{в}^{-1}$	$R_n, \%$
ЛД.10	7	9,52	45,19	0,1097	0,3312	0,7
ЛД.2	7	11,10	29,33	0,0847	0,2911	0,99
ЛД.5	22	11,95	40,34	13,0177	3,608	8,9
ЛД.8	30	14,50	46,93	3,7608	1,9393	4,1
ЛД.11	30	14,97	45,57	13,8944	3,7275	8,2
ЛД.9	30	15,48	45,75	13,7663	3,7103	8,1
ЛД.6	4	16,52	44,35	3,9797	1,9949	4,5
ЛД.3	4	16,52	32,03	0,2168	0,4656	1,45
ЛД.7	30	17,05	43,69	2,1486	1,4658	3,4
ЛД.4	22	19,2	40,55	7,1734	2,6783	6,6
ЛД.1	6	31,84	44,68	2,4749	1,5732	3,5

Таблиця 2.6 – 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

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{F}_{\text{дол}}, \text{mc}$	$D_F, (\text{mc})^2$	σ_F, mc	$R_F, \%$
ЛД.10	7	9,52	1,6486	0,0469	0,2166	13,1
ЛД.2	7	11,10	1,1457	0,006	0,0774	6,8
ЛД.5	22	11,95	1,295	0,1057	0,3252	2,51
ЛД.8	30	14,50	1,486	0,1808	0,4252	28,6
ЛД.11	30	14,97	1,6783	0,0908	0,3014	18,0

Продовження табл. 2.6

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{F}_{ДОЛ}, mc$	$D_F,$ $(mc)^2$	$\sigma_F,$ mc	$R_F,$ %
ЛД.9	30	15,48	1,8867	0,1707	0,4132	21,9
ЛД.6	4	16,52	1,485	0,0291	0,1706	11,5
ЛД.3	4	16,52	1,4325	0,0852	0,2919	20,4
ЛД.7	30	17,05	1,5137	0,2372	0,487	32,2
ЛД.4	22	19,2	1,7182	0,2078	0,4558	26,5
ЛД.1	6	31,84	0,9283	0,0886	0,2976	32,1

За методикою аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин (розділ 2.3) режимні параметри буріння, до яких відносяться осьове навантаження на долото і частота його обертання – це зовнішні незалежні чинники (фактори) будь-яких експериментальних досліджень процесу руйнування породи і для вибірок їх дискретних значень визначення артефактів не проводиться.

Таблиця 2.7 – Статистичні характеристики вибірок обертового моменту ротора $T_{P,i}, \kappa H \cdot m$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} - T_{P.MAX}$	$D_T,$ $(\kappa H \cdot m)^2$	$\sigma_T,$ $\kappa H \cdot m$	$R_T,$ %
ЛД.10	7	9,52	4,60 2,78-7,19	2,4939	1,5792	34,3
ЛД.2	7	11,10	1,72 0,92-3,79	2,0638	1,4366	83,5
ЛД.5	22	11,95	3,58 2,98...4,18	0,1378	0,3712	10,4
ЛД.8	30	14,50	5,84 2,62-7,43	2,3942	1,5473	26,5
ЛД.11	30	14,97	5,43 2,71-7,26	2,5402	1,5938	29,4
ЛД.9	30	15,48	5,52 3,13-7,15	1,7124	1,3086	23,7
ЛД.6	4	16,52	4,95 4,86-5,03	0,00543	0,0737	1,5
ЛД.3	4	16,52	1,52 1,43-1,6	0,00523	0,0723	4,8
ЛД.7	30	17,05	6,0 4,03-7,364	0,6719	0,8197	13,7
ЛД.4	22	19,2	2,30 1,72-2,86	0,1229	0,3506	15,2
ЛД.1	6	31,84	6,08 3,69-7,32	1,7665	1,3291	21,9

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень механічної швидкості буріння керуватись положеннями методики за якою, при $R_T \leq 10\%$ мінливість значень у вибірці помірна і визначення артефактів не проводиться. При $10\% < R_T \leq 20\%$ мінливість значень у вибірці середня і визначення артефактів проводиться при $n \geq 10$. Якщо коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R_T \leq 30\%$, то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки. Згідно табл. 2.7, з урахуванням сказаного вище, перевірка на наявність артефактів проводиться для девяти з одинадцяти вибірок значень обертового моменту.

Таблиця 2.8 – Визначення артефактів для вибірок значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P$	σ_T	t_{kp} і α	Δ	$\bar{T}_P - \Delta$, $\bar{T}_P + \Delta$
ЛД.10	7	9,52	4,60	1,5792	2,45 $\alpha=0,05$	4,14	0,46-8,74 Арт. відс.
ЛД.2	7	11,10	1,72	1,4366	2,45 $\alpha=0,05$	3,76	-1,44-5,48 Арт. відс.
ЛД.5	22	11,95	3,58	0,3712	2,08 $\alpha=0,05$	0,79	2,79-4,37* Арт. відс.
ЛД.8	30	14,50	5,84	1,5473	2,05 $\alpha=0,05$	3,22	2,62-9,06* Арт. відс.
ЛД.11	30	14,97	5,43	1,5938	2,05 $\alpha=0,05$	3,32	2,11-8,75* Арт. відс.
ЛД.9	30	15,48	5,52	1,422	2,05 $\alpha=0,05$	2,96	2,56-8,48* Арт. відс.
ЛД.7	30	17,05	6,0	0,8197	2,52 $\alpha=0,02$	2,11	3,89-8,11* Арт. відс.
ЛД.4	22	19,2	2,30	0,3506	2,08 $\alpha=0,05$	0,746	1,55-3,5 Арт. відс.
ЛД.1	6	31,84	6,08	1,3291	2,57 $\alpha=0,05$	3,69	2,39-9,77 Арт. відс.

Третій етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська - 104 при відсутності розподілу діапазону поглиблення на інтервали геологічних досліджень". 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 аналізованої величини поглиблення свердловини

Цей етап виконується тільки для вибірок, значення яких розподіляються за нормальним законом. Експрес-метод підтвердження нормального закону розподілу дискретних значень вибірок технологічних параметрів процесу буріння полягає у перевірці умов $A < 3 \cdot \sigma_A$; $E < 3 \cdot \sigma_E$. Якщо нерівності підтверджуються, то дискретні значення вибірки розподіляються за нормальним законом; якщо одна з умов не виконується, то нормальний закон розподілу відхиляється і для цих вибірок перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться.

В табл. 3.1 наведено результати перевірки відповідності нормальному закону розподілу дискретних значень механічної швидкості буріння вибірок виділених лінійних ділянок.

Таблиця 3.1 – Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $V_{mex.i}$ нормальному закону (закону Гаусса)

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_V	$M_{3,V}$	$M_{4,V}$	A_V , $3\sigma_{A,V}$	E_V , $3\sigma_{E,V}$
ЛД.10	7	9,5229	99,4302	1123,92	13514,82	3,1941	10,5087	132,60	0,32 2,012	-1,726 2,646
ЛД.2	6	11,105	141,3734	2099,89	35605,57	4,6543	128,995	1310,11	1,279 2,07	-0,208 2,51

Продовження табл. 3.1

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$m1$	$m2$	$m3$	$m4$	σ_V	$M3.V$	$M4.V$	$AV, 3\sigma A.V$	$EV, 3\sigma E.V$
ЛД.5	21	11,9495	157,3364	2264,552	35220,94	3,9081	36,8292	609,366	0,62 1,401	-0,388 2,493
ЛД.8	30	14,5017	244,8396	4739,842	103083,4	5,9777	187,466	4400,53	0,878 1,237	0,45 2,246
ЛД.11	30	14,971	304,5591	8779,34	329404,5	9,1215	1811,60	62525,2	2,387 1,237	6,032 2,246
ЛД.9	30	15,4783	283,913	5951,746	137818,5	6,7723	183,936	5249,8	0,59 1,237	-0,50 2,246
ЛД.6	4	16,515	287,9653	5280,51	101136,3	4,5048	32,044	382,899	0,35 2,151	-2,070 1,746
ЛД.3	4	16,515	287,9653	5280,51	101136,3	4,5048	32,044	382,899	0,35 2,151	-2,070 1,746
ЛД.7	30	17,0463	323,5401	6701,253	148481,4	5,8396	62,271	2329,88	0,31 1,237	-0,996 2,246
ЛД.4	22	19,2027	394,5365	8582,58	195590,3	5,1982	15,831	1336,81	0,11 1,377	-1,169 2,46
ЛД.1	6	31,8449	1096,764	39774,08	1491817	9,9599	-417,25	13583,2	-0,422 2,07	-1,6197 2,51

При перевірці нульової гіпотези про нормальний закон розподілу дискретних значень механічної швидкості буріння за вибірками виділених лінійних ділянок ця гіпотеза відхиляється для вибірок, виділених жирним косим шрифтом в табл.3.1. Всі ці вибірки належать до різних генеральних сукупностей.

Таблиця 3.2 – Перевірка нульових гіпотез $D_{V.j} = D_{V.k}$ та альтернативної $D_{V.j} \neq D_{V.k}$, $\alpha=0,01$

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX},$ $m / год$	$D_V,$ $(m / год)^2$	n	$F_{СП}$	$F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{V.j} = D_{V.k}$
ЛД.10	9,52	10,203	7	2,12	8,47	Підтверджена
ЛД.2	11,10	21,6617	6			
ЛД.10	9,52	10,203	7	1,5	7,39	Підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21			
ЛД.10	9,52	10,203	7	2,82	7,24	Підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			
ЛД.10	9,52	10,203	7	4,50	7,24	Підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.10	9,52	10,203	7	3,34	7,24	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.10	9,52	10,203	7	2,65	7,31	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.10	9,52	10,203	7	9,72	8,75	Не підтверджена
ЛД.1	31,84	99,1929	6			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,42	9,55	Підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,33	9,38	Підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	2,12	9,38	Підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,44	9,38	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			

Продовження табл. 3.2

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$D_V,$ (м / год) ²	n	$F_{СП}$	$F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{V.j} = D_{V.k}$
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,25	9,25	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	4,58	10,97	Підтверджена
ЛД.1	31,84	99,1929	6			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	1,88	2,77	Підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	3,00	2,77	Не підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	2,23	2,77	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	1,77	2,86	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	6,49	4,1	Не підтверджена
ЛД.1	31,84	99,1929	6			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	1,6	2,41	Підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	1,19	2,41	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	1,06	2,72	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	3,52	3,73	Підтверджена
ЛД.1	31,84	99,1929	6			
ЛД.9	15,48	45,8631	30	1,34	2,41	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.9	15,48	45,8631	30	1,70	2,72	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.9	15,48	45,8631	30	2,16	3,73	Підтверджена
ЛД.1	9,52	99,1929	6			
ЛД.7	17,05	34,0993	30	1,26	2,72	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.7	17,05	34,0993	30	2,91	3,73	Підтверджена
ЛД.1	9,52	99,1929	6			
ЛД.4	19,2	27,02	22	3,67	4,04	Підтверджена
ЛД.1	31,84	99,1929	6			

В табл. 3.3 наведено результати перевірки нульової $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$ та альтернативної гіпотез $\bar{V}_{MEX.j} \neq \bar{V}_{MEX.k}$ при рівні значущості $\alpha=0,05$.

Таблиця 3.3 – Перевірка нульової $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$ та альтернативної - $\bar{V}_{MEX.j} \neq \bar{V}_{MEX.k}$ гіпотез, $\alpha=0,05$

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$D_V,$ (м / год) ²	n	$T_{СП}$	$T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$
ЛД.10	9,52	10,203	7	0,72	2,2	Підтверджена
ЛД.2	11,10	21,6617	6			
ЛД.10	9,52	10,203	7	1,48	2,06	Підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21			
ЛД.10	9,52	10,203	7	2,35	2,03	Не підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			

Продовження табл. 3.3

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEH},$ $m / \text{год}$	$D_V,$ $(m / \text{год})^2$	n	$T_{СП}$	$T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{V}_{MEH.j} = \bar{V}_{MEH.k}$
ЛД.10	9,52	10,203	7	2,25	2,03	Не
ЛД.9	15,48	45,8631	30			підтверджена
ЛД.10	9,52	10,203	7	3,28	2,03	Не
ЛД.7	17,05	34,0993	30			підтверджена
ЛД.2	11,10	21,6617	6	0,45	2,06	Підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,44	2,03	Підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	1,51	2,03	Підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.2	11,10	21,6617	6	2,34	2,03	Не
ЛД.7	17,05	34,0993	30			підтверджена
ЛД.2	11,10	21,6617	6	3,45	2,06	Не
ЛД.4	19,2	27,02	22			підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21	1,86	2,02	Підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30			
ЛД.5	11,95	15,2726	21	3,48	2,02	Не
ЛД.7	17,05	34,0993	30			підтверджена
ЛД.5	11,95	15,2726	21	5,15	2,02	Не
ЛД.4	19,2	27,02	22			підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30	0,62	2,01	Підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	1,76	2,01	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.8	14,50	28,7324	30	3,16	2,01	Не
ЛД.4	19,2	27,02	22			підтверджена
ЛД.8	14,50	28,7324	30	6,20	2,03	Не
ЛД.1	31,84	99,1929	6			підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30	0,96	2,01	Підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30			
ЛД.9	15,48	45,8631	30	2,15	2,01	Не
ЛД.4	19,2	27,02	22			підтверджена
ЛД.9	15,48	45,8631	30	4,99	2,03	Не
ЛД.1	31,84	99,1929	6			підтверджена
ЛД.7	17,05	34,0993	30	1,37	2,01	Підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22			
ЛД.7	17,05	34,0993	30	5,0	2,03	Не
ЛД.1	31,84	99,1929	6			підтверджена
ЛД.4	19,2	27,02	22	4,29	2,06	Не
ЛД.1	31,84	99,1929	6			підтверджена

В табл. 3.4 наведено можливі варіанти входження до генеральної сукупності (ГС) вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння.

Таблиця 3.4 – Можливі варіанти входження в генеральні сукупності (ГС) вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння за табл. 3.2 і 3.3

Позначення	ВОДПС.10	ВОДПС.2	ВОДПС.5	ВОДПС.8	ВОДПС.9	ВОДПС.7	ВОДПС.4	ВОДПС.1
ВОДПС.10		ГС	ГС	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.
ВОДПС.2	ГС		ГС	ГС	ГС	Відс.	Відс.	Відс.
ВОДПС.5	ГС	ГС		ГС	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.
ВОДПС.8	Відс.	ГС	ГС		ГС	ГС	Відс.	Відс.
ВОДПС.9	Відс.	ГС	Відс.	ГС		ГС	Відс.	Відс.
ВОДПС.7	Відс.	Відс.	Відс.	ГС	ГС		ГС	Відс.
ВОДПС.4	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	ГС		Відс.
ВОДПС.1	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	

Для підтвердження або заперечення належності до однієї ГС вибірок дискретних значень механічної швидкості за всіма наведеними вище варіантами (див. табл.3.4), проводимо перевірку нульових гіпотез $D_{n,j} = D_{n,k}$, $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, для вибірок дискретних значень частоти обертання долота. Цей етап виконується тільки для вибірок, значення яких розподіляються за нормальним законом. Експрес-метод підтвердження нормального закону розподілу дискретних значень вибірок технологічних параметрів процесу буріння полягає у перевірці умов $A_n < 3 \cdot \sigma_{A,n}$; $E_n < 3 \cdot \sigma_{E,n}$. Якщо нерівності підтверджуються дискретні значення вибірки розподіляються за нормальним законом, якщо одна з умов не виконується, нормальний закон розподілу відхиляється і для цих вибірок перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться.

Таблиця 3.5 – Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $\bar{n}_{d,i}$ нормальному закону (закону Гаусса)

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_n	$M_{3,n}$	$M_{4,n}$	A_n $3\sigma_{A,n}$	E_n $3\sigma_{E,n}$
ЛД.10	7	45,1886	2042,10	92288,1	4170941	0,3248	0,28	-22	8,172 2,01	-1977 2,646
ЛД.2	7	29,3286	860,2377	25233,82	740261,9	0,2876	0,09	-1,866	3,78 2,01	-237,9 2,646
ЛД.5	22	40,3382	1639,604	67152,52	2771063	3,6091	10,746	255,92	0,228 1,377	-1,49 2,46
ЛД.8	30	46,9279	2205,872	103859,7	4898167	1,9416	0,73	70,538	0,0997 1,236	1,96 2,25
ЛД.9	30	45,7519	2106,552	97558,41	4542466	3,7114	-38,779	687,93	-0,76 1,236	0,62 2,25
ЛД.7	30	43,6857	1910,514	83645,01	3666192	1,4646	1,694	7,0795	0,54 1,236	-1,46 2,25
ЛД.4	22	40,5499	1651,149	67497,99	2768021	2,6797	-11,844	-1387,87	-0,62 1,377	-29,92 2,46

При перевірці нульової гіпотези про нормальний закон розподілу дискретних значень частоти обертання за вибірками виділених лінійних ділянок ця гіпотеза відхиляється для вибірок виділених жирним косим шрифтом в табл.3.5. Всі ці вибірки належать до різних генеральних сукупностей.

Таблиця 3.6 – Перевірка нульових $D_{.n.j} = D_{n.k}$, $\alpha = 0,01$; $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, $\alpha = 0,05$ та альтернативних

$D_{.n.j} \neq D_{n.k}$, $\alpha = 0,01$ $\bar{n}_j \neq \bar{n}_k$, $\alpha = 0,05$ гіпотез

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$D_n, (\text{хв}^{-1})^2$	N	$F_{СП} < F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{n.x} = D_{n.y}$	Перевірка умови $T_{СП} < T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{n}_{d.x} = \bar{n}_{d.y}$	
ЛД.5	40,34	13,0177	22	3,46>2,73	Не підтверджена	Не підтверджена $D_{n.j} \neq D_{n.k}$		
ЛД.8	46,93	3,7608	30					
ЛД.5	40,34	13,0177	22	1,06<2,73	Підтверджена	5,26>2,01	Не підтверджена	
ЛД.9	45,75	13,7663	30					
ЛД.8	46,93	3,7608	30	3,66>2,42	Не підтверджена	Не підтверджена $D_{n.j} \neq D_{n.k}$		
ЛД.9	45,75	13,7663	30					
ЛД.8	46,93	3,7608	30	1,75<2,42	Підтверджена	7,32>2,01	Не підтверджена	
ЛД.7	43,68	2,1486	30					
ЛД.9	45,75	13,7663	30	6,41>2,42	Не підтверджена	Не підтверджена $D_{n.j} \neq D_{n.k}$		
ЛД.7	43,6857	2,1486	30					

Згідно викладеного матеріалу за результатами перевірки закону розподілу і параметричних статистичних гіпотез про рівність вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і частоти обертання долота, всі виділені лінійні ділянки за цими технологічними параметрами належать до різних генеральних сукупностей. В табл. Д2 наведено результати виділення однорідних лінійних ділянок в інтервалі заглиблення 33-253м і відповідні цим ділянкам результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння.

Таблиця Д1.2 – Однорідні лінійні ділянки і результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння в діапазоні заглиблення 33-253 м закінченої свердловини Ужгородська 104 в порядку зростання середнього вибірок значень механічної швидкості буріння

№ ЛД і інтервал заглиблення свердловини	n	$\bar{V}'_{\text{МЕХ}}$	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$\bar{F}_{\text{ДОЛ}}, \text{тс}$	$\bar{T}_p, \text{кН} \cdot \text{м}$	$T_{p.\text{МІН}} - T_{p.\text{МАХ}}$
ЛД.10 213-220м	7	9,52	45,19	1,6486	4,6	2,78-7,19
ЛД.2 47-54м	6	11,10	29,33	1,1457	1,72	0,92-3,79
ЛД.5 85-107м	21	11,95	40,34	1,295	3,58	2,98-4,18
ЛД.8 153-183м	30	14,5	46,93	1,486	5,84	2,62-7,43
ЛД.11 223-253м	30	14,97	45,57	1,6783	5,43	2,71-7,26
ЛД.9 153-183м	30	15,48	45,75	1,8867	5,52	3,13- 7,31
ЛД.3 58-62м	4	16,52	32,03	1,4325	1,52	1,43-1,6
ЛД.6 118-122м	4	16,52	44,35	1,485	4,95	4,86-5,03
ЛД.7 123-153м	30	17,05	44,69	1,5137	6,0	4,03-7,364
ЛД.4 63-85м	22	19,2	40,55	1,7182	2,3	1,66-2,86
ЛД.1 37-43м	1	31,84	44,68	0,9283	6,08	3,69-7,32

Додаток Г

Методика аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом

Таблиця Д1 – Значення технологічних параметрів в інтервалі поглиблення 450-600 м закінченої свердловини за інтервалами відбору геологічних досліджень

№	Глибина, м	Навтаження на долото $F_d, \text{тс}$	Обертний момент ротора $T_{об.р}, \text{кН}\cdot\text{м}$	Частота обертання ротора $n_p, \text{хв}^{-1}$	Частота обертання долота $n_d, \text{хв}^{-1}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех}, \text{м/год}$	Інтервал проведення геологічних досліджень, м
1	450	2,6	7,27	52,32	52,32	9,34	Геологічний інтервал 450-460м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 70%, пісок світло-сірий, кварцевий - 30%
2	451	3,06	5,74	51,84	51,84	10,71	
3	452	2,83	7,3	51,6	51,6	13,34	
4	453	0,45	2,67	52,56	52,56	2,34	
5	454	1,5	7,19	56,64	56,64	39,61	
6	455	1,98	6,13	52,08	52,08	7,84	
7	456	1,56	6,22	50,16	50,16	9,64	
8	457	1,62	6,72	50,4	50,4	25,03	
9	458	1,16	1,63	52,32	52,32	37,16	
19	459	2,01	5,18	50,64	50,64	22,83	
11	460	2,1	6,76	48,96	48,96	13,06	
12	461	0,00	1,71	32,16	32,16	6,72	Геологічний інтервал 460-470м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 85%, пісок світло-сірий, кварцевий - 15%
13	462	0,82	4,85	44,88	44,88	28,65	
14	463	0,73	2,80	44,16	44,16	47,42	
15	464	0,73	5,07	41,76	41,76	23,78	
16	465	1,44	6,73	44,88	44,88	22,13	
17	466	1,47	7,29	43,20	43,20	10,13	
18	467	1,69	1,82	42,48	42,48	11,39	
19	468	1,46	2,65	52,08	52,08	10,33	
20	469	1,52	2,89	51,60	51,60	12,34	
21	470	1,89	5,68	50,40	50,40	17,54	
22	471	1,4	3,77	43,44	43,44	14,19	Геологічний інтервал 470-480м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісок світло-сірий, кварцевий - 5%
23	472	1,36	5,08	47,76	47,76	14,02	
24	473	1,01	1,49	48,72	48,72	14,58	
25	474	1,52	6,64	39,60	39,60	5,52	
26	475	1,33	1,51	49,20	49,20	22,83	
27	476	1,46	2,1	47,52	47,52	8,65	
28	477	1,84	4,25	48,00	48,00	6,05	
29	478	1,69	3,72	46,80	46,80	8,18	
30	479	1,52	4,94	51,12	51,12	10,52	
31	480	2,52	7,25	48,00	48,00	13,50	
32	481	2,6	7,3	42,72	42,72	25,56	Геологічний інтервал 480-490м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%,
33	482	1,95	5,1	45,12	45,12	13,37	
34	483	1,92	7,08	44,40	44,40	10,57	
35	484	2,32	7,17	45,60	45,60	15,47	
36	485	2,12	6,80	45,84	45,84	10,28	
37	486	2,00	3,74	46,56	46,56	14,52	
38	487	2,26	6,68	45,84	45,84	13,86	
39	488	2,46	5,23	46,80	46,80	16,31	
40	489	2,06	6,78	47,04	47,04	18,39	
41	490	1,3	2,11	47,76	47,76	13,70	
42	491	2,20	6,93	45,60	45,60	10,99	Геологічний інтервал 490-500м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%,
43	492	1,89	7,12	44,64	44,64	14,02	
44	493	1,55	4,73	45,84	45,84	15,25	
45	494	2,26	7,26	43,92	43,92	10,51	
46	495	2,35	3,36	54,96	54,96	11,46	
47	496	1,75	6,78	53,76	53,76	10,91	

Продовження табл. Д1

№	Глибина, м	Навтаження на долото $F_{д,тс}$	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 $V_{мех}, м/год$	Інтервал відбору геологічних досліджень, м
48	497	1,95	3,69	55,92	55,92	15,78	Геологічний Інтервал 490-500м
49	498	1,98	2,69	55,44	55,44	19,34	
50	499	2,23	7,24	51,84	51,84	16,92	
51	500	1,87	1,4	51,36	51,36	13,80	
52	501	2,55	6,03	50,45	50,45	14,7	Геологічний Інтервал 500-510м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%
53	502	2,40	7,09	49,18	49,18	14,7	
54	503	2,03	3,76	52,73	52,73	13,65	
55	504	2,40	7,23	52,23	52,23	8,08	
56	505	1,98	3,91	53,49	53,49	9,98	
57	506	2,26	5,82	53,24	53,24	10,2	
58	507	2,03	3,09	52,99	52,99	11,48	
59	508	1,84	3,72	53,24	53,24	10,45	
60	509	2,00	2,77	52,99	52,99	24,04	
61	510	1,52	3,84	52,48	52,48	13,4	
62	511	1,75	4,21	51,97	51,97	9,31	Геологічний інтервал 510-520м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%
63	512	2,09	6,88	51,46	51,46	7,77	
64	513	1,61	2,62	52,23	52,23	8,64	
65	514	1,87	7,0	51,21	51,21	15,21	
66	515	2,35	4,09	51,72	51,72	16,84	
67	516	1,98	4,45	50,7	50,7	15,27	
68	517	1,92	4,9	51,21	51,21	18,77	
69	518	1,78	3,71	52,73	52,73	18,33	
70	519	2,06	6,02	50,96	50,96	14,2	
71	520	1,81	3,53	54,0	54,0	11,48	
72	521	1,61	4,23	54,25	54,25	8,19	Геологічний інтервал 520-530м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 70%, пісковик сірий, різнозернистий - 30%
73	522	2,26	5,62	53,49	53,49	9,03	
74	523	2,12	7,21	52,48	52,48	9,82	
75	524	2,14	6,72	51,72	51,72	11,63	
76	525	2,0	5,1	52,23	52,23	17,71	
77	526	1,72	6,17	51,72	51,72	20,02	
78	527	2,23	7,03	50,2	50,2	18,67	
79	528	1,4	3,74	53,24	53,24	31,07	
80	529	1,4	7,21	58,82	58,82	5,98	
81	530	1,95	4,72	56,28	56,28	13,4	
82	531	2,03	5,7	57,8	57,8	14,89	Геологічний інтервал 530-540м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 80%, пісковик сірий, різнозернистий - 20%
83	532	1,43	5,65	57,55	57,55	14,89	
84	533	0,98	6,48	59,32	59,32	27,57	
85	534	1,72	6,66	68,45	68,45	5,92	
86	535	1,18	5,55	68,45	68,45	14,64	
87	536	1,21	3,69	68,45	68,45	28,27	
88	537	1,49	7,25	54,0	54,0	32,93	
89	538	1,1	5,5	50,2	50,2	12,86	
90	539	1,36	4,58	49,44	49,44	18,38	
91	540	1,66	7,23	59,58	59,58	15,35	
92	541	1,78	3,6	62,37	62,37	7,97	Геологічний інтервал 540-550м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%
93	542	1,46	7,28	60,34	60,34	17,08	
94	543	1,43	7,22	61,35	61,35	16,07	
95	544	1,89	6,34	61,35	61,35	11,34	
96	545	0,73	3,34	62,37	62,37	15,54	
97	546	1,33	3,96	62,11	62,11	24,62	
98	547	1,15	6,38	60,85	60,85	14,36	
99	548	1,13	3,43	62,87	62,87	8,64	
100	549	2,06	7,3	56,54	56,54	28,16	
101	550	1,52	3,95	63,13	63,13	8,26	

Продовження табл. Д1

№	Глибина, м	Навтаження на долото $F_{д,тс}$	Обертний момент ротора $T_{об,р}, кН·м$	Частота обертання ротора $n_{р}, хв^{-1}$	Частота обертання долота $n_{д}, хв^{-1}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех}, м/год$	Інтервал відбору геологічних досліджень, м
102	551	0,89	5,42	61,61	61,61	26,02	Геологічний інтервал 550-560м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%
103	552	1,3	5,88	63,13	63,13	28,47	
104	553	0,89	4,51	62,87	62,87	20,42	
105	554	1,15	5,52	58,82	58,82	15,38	
106	555	1,27	6,13	57,3	57,3	18,63	
107	556	0,92	4,39	62,62	62,62	9,48	
108	557	1,52	7,16	60,08	60,08	7,0	
109	558	1,36	5,78	65,41	65,41	10,36	
110	559	1,46	4,09	66,17	66,17	20,03	
111	560	1,95	3,6	64,9	64,9	15,4	
112	561	1,36	7,24	65,66	65,66	13,32	Геологічний інтервал 550-560м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%
113	562	1,36	4,15	65,66	65,66	14,52	
114	563	1,98	4,07	65,41	65,41	17,41	
115	564	2,09	5,59	64,14	64,14	17,5	
116	565	1,21	7,27	66,68	66,68	14,34	
117	566	1,3	7,32	64,9	64,9	8,15	
118	567	1,33	7,31	62,37	62,37	6,36	
119	568	1,04	4,71	62,87	62,87	19,26	
120	569	1,15	7,12	58,56	58,56	23,34	
121	570	1,33	2,75	59,58	59,58	24,44	
122	571	1,33	7,04	57,8	57,8	23,49	Геологічний інтервал 560-570м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%
123	572	1,12	7,31	53,24	53,24	21,39	
124	573	1,04	5,99	58,82	58,82	13,6	
125	574	1,21	4,65	56,79	56,79	15,51	
126	575	0,96	3,44	52,48	52,48	21,26	
127	576	1,04	7,21	58,82	58,82	11,91	
128	577	0,9	7,16	62,37	62,37	14,01	
129	578	1,6	7,13	66,42	66,42	19,64	
130	579	0,96	3,16	70,99	70,99	15,92	
131	580	1,89	3,62	69,46	69,46	14,86	
132	581	1,21	6,58	67,18	67,18	14,46	Геологічний інтервал 580-590м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%,
133	582	0,79	4,94	70,23	70,23	19,46	
134	583	1,47	6,4	67,94	67,94	18,76	
135	584	1,41	7,31	70,23	70,23	23,18	
136	585	0,38	5,34	57,3	57,3	13,05	
137	586	1,15	7,26	58,82	58,82	12,8	
138	587	1,81	7,29	59,07	59,07	24,6	
139	588	1,09	7,29	58,82	58,82	28,25	
140	589	1,98	6,51	57,3	57,3	24,96	
141	590	2,23	3,96	58,82	58,82	20,8	
142	591	1,33	7,26	59,07	59,07	26,39	Геологічний інтервал 590-600м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%
143	592	1,78	7,3	55,01	55,01	15,65	
144	593	1,27	5,5	57,04	57,04	20,95	
145	594	0,64	2,76	60,08	60,08	20,54	
146	595	1,17	6,83	54,25	54,25	17,87	
147	596	1,63	6,52	55,52	55,52	21,89	
148	597	1,11	6,96	55,27	55,27	24,77	
149	598	0,83	6,22	57,30	57,30	25,65	
150	599	0,71	2,76	55,77	55,77	19,02	
151	600	0,68	6,2	56,54	56,54	19,10	

Перший етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом". Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини

1. Перший геологічний інтервал (ІГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.1.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при бурінні в першому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 450-460м, літологічні характеристики породи: глина сіра - 70%, пісок світло-сірий, кварцевий - 30%											
Глибина,м	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	10,71	13,34	2,34	39,61	7,84	9,64	25,03	37,16	22,83	13,06
ΔT_B	год	0	0,0934	0,0750	0,4274	0,0252	0,1276	0,1037	0,0400	0,0269	0,0438
	хв	0	5,60	4,50	25,64	1,51	7,66	6,22	2,40	1,61	2,63
T_B ,хв	0	5,6	10,1	35,74	37,25	44,91	51,13	53,53	55,14	57,77	62,37

Перший варіант об'єму вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки першого геологічного інтервалу 450-460 м починається з заглиблення 450 м. Результати перевірки трьох умов лінійності наведено в табл. 1.1.2.

Таблиця 1.1.2 – Перевірка умов лінійності для першого варіанту вибірки значень T_B і H_B

Глибина,м	450	451	452	453	454	A	B	C	D	K
H_B , м	0	1	2	3	4	0,08541	0,485	1,0736	10	8,9482
$V_{MEH,i}$, м/год	-	10,71	13,34	2,34	39,61	$F_{СП}$	$T_{СП}$	r	P%	σ_0
ΔT_B , хв	0	5,60	4,50	25,64	1,51	25,005	27,09	0,9453	$-3,55 \cdot 10^{-14}$	0,52
T_B , хв	0	5,6	10,1	35,74	37,25					
Перша умова лінійності не виконується, нульова гіпотеза виконується - A=0. $F_{СП} = 25,005 < F_{KP(0,01;1;3)} = 34,117$.										
Друга умова лінійності виконується, нульова гіпотеза не підтверджена $r \neq 0$ $T_{СП} = 27,09 > T_{KP(0,05;3)} = 3,18$. Ймовірність прийняття рішення - $P > 0,95$										
Третя умова лінійності не виконується: $\sigma_0 = 0,52 > 0,1\bar{H}_B = 0,1 \cdot 2 = 0,2$.										

За перевіркою трьох умов підтвердження емпіричного рівняння лінійної регресії дві з них, не підтверджені, перша – при $\alpha=0,01$, тобто можна вважати це рівняння за парами значень T_B і H_B нелінійне, або T_B і H_B – це незалежні випадкові величини.

Другий варіант об'єму вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки геологічного інтервалу 450-460 м починається з заглиблення 451 м. Результати перевірки трьох умов лінійності в першому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 451 м, наведено в табл. 1.1.3.

Таблиця 1.1.3 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 490-500 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$	$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0	
451-455	0,0849	0,2063	5	26,5	34,12	n'=3	5,15	3,18	n'=3	2,0	0,5
452-456	0,093	-0,3943	5	16,84	34,12	n'=3	4,1	3,18	n'=3	2,0	0,61
453-457	0,1940	0,2983	5	71,00	34,12	n'=3	8,43	3,18	n'=3	2,0	0,32
454-458	0,2058	-0,2928	5	31,90	34,12	n'=3	5,65	3,18	n'=3	2,0	0,46
454-459	0,3120	-0,3668	5	38,42	34,12	n'=3	6,2	3,18	n'=3	2,0	0,42
455-460	0,3598	0,2522	5	74,61	34,12	n'=3	8,64	3,18	n'=3	2,0	0,31

Значення $F_{СП}$, за яких в перша умова лінійності не підтверджена, виділені жирним шрифтом.

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом

За наведеним вище матеріалом в першому геологічному інтервалі однорідні лінійні ділянки не виявлені.

2. Другий геологічний інтервал (2ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.2.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в другому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 460-470 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 85%, пісок світло-сірий, кварцевий - 15%											
Глибина,м	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	6,72	28,65	47,42	23,78	22,13	10,13	11,39	10,33	12,34	17,54
ΔT_B	год	0	0,1488	0,0349	0,0211	0,0420	0,0452	0,0987	0,0878	0,0968	0,0810
	хв	0	8,93	2,09	1,27	2,52	2,71	5,93	5,27	5,81	4,86
T_B ,хв	0	8,93	11,02	12,29	14,81	17,52	23,45	28,72	34,53	39,39	42,81

Перший варіант мінімального об'єму вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки другого геологічного інтервалу 460-470 м починається з заглиблення 460 м. Результати перевірки трьох умов лінійності в другому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 460 м, наведено в табл. 1.2.2.

Таблиця 1.2.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 490-500 м

заглиблення 450-500 м											
Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
460-464	0,2560	-0,4090	5	16,3	34,12	$n'=3$	4,0	3,18	$n'=3$	2,0	0,62
461-465	0,4701	0,1281	5	194,6	34,12	$n'=3$	13,9	3,18	$n'=3$	2,0	0,195
461-466	-	-	6	55,21	21,2	$n'=4$	7,43	2,78	$n'=4$	2,5	0,486
Перша лінійна ділянка виділена в інтервалі 461-465м											
465-469	0,1822	-0,0414	5	3060	34,12	$n'=3$	55	3,18	$n'=3$	2,0	0,049
465-470	0,1932	-0,1172	6	625	21,2	$n'=4$	25	2,78	$n'=4$	2,5	0,149

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 460-470 м виділено дві лінійні ділянки, $H_B=4$ м: 2ГІ.1 – заглиблення свердловини 461-465м; 2ГІ.2, $H_B=5$ м – заглиблення свердловини 465-470 м.

За лінійним рівнянням регресії першої лінійної ділянки $H_{B.f} = 0,4701 \cdot T_B + 0,1281 = 0,4701 \cdot 8,59 + 0,1281 = 4,17$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 2ГІ.1: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 4,17 \text{ м} / 0,1432 \text{ год} = 29,12 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,1432 \text{ год} = 27,94 \text{ м} / \text{год}$.

За рівнянням регресії для другої лінійної ділянки 2ГІ $H_{B.f} = 0,1932 \cdot T_B - 0,1172 = 0,1932 \cdot 25,28 - 0,1172 = 4,77$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 2ГІ.2: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 4,77 \text{ м} / 0,4213 \text{ год} = 11,32 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 5 \text{ м} / 0,4213 \text{ год} = 11,87 \text{ м} / \text{год}$.

3. Третій геологічний інтервал (3ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.3.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв

Геологічний інтервал 470-480м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісок світло-сірий, кварцевий - 5%											
Глибина,м	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	14,19	14,02	14,58	5,52	22,83	8,65	6,05	8,18	10,52	13,5
ΔT_B	год	0	0,0705	0,0713	0,0686	0,1812	0,0438	0,1156	0,1653	0,1222	0,0951
	хв	0	4,23	4,28	4,12	10,87	2,63	6,94	9,92	7,33	5,70
T_B ,хв	0	4,23	8,51	12,63	23,5	26,13	33,07	42,99	50,32	56,02	60,46

Результати перевірки трьох умов лінійності в третьому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 470 м, наведено в табл. 1.3.2.

Таблиця 1.3.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 490-500 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\overline{H}_B$	σ_0
470-474	-	-	5	52,59	34,12	$n'=3$	7,25	3,18	$n'=3$	2,0	0,37
471-475	-	-	5	72,86	34,12	$n'=3$	8,54	3,18	$n'=3$	2,0	0,31
472-476	-	-	5	98,75	34,12	$n'=3$	9,94	3,18	$n'=3$	2,0	0,27
473-477	-	-	5	94,07	34,12	$n'=3$	9,7	3,18	$n'=3$	2,0	0,29
474-478	0,1374	0,3918	5	93,4	34,12	$n'=3$	9,66	3,18	$n'=3$	2,0	0,62
475-479	0,1288	-0,0066	5	389	34,12	$n'=3$	19,74	3,18	$n'=3$	2,0	0,14
475-480	0,1391	-0,1008	6	258	21,2	$n'=4$	16,06	2,78	$n'=4$	2,5	0,23

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

В третьому геологічному інтервалі виділено одну лінійну ділянку, заглиблення свердловини від 475-480 м, $H_B=5$ м. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,1391 \cdot T_B - 0,1008 = 0,1391 \cdot 34,33 - 0,1008 = 4,67$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки ЗГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 4,67 \text{ м} / 0,5722 \text{ год} = 8,16 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 5 \text{ м} / 0,5722 \text{ год} = 8,74 \text{ м} / \text{год}$.

4. Четвертий геологічний інтервал (4ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.4.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в четвертому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 480-490м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%,											
Глибина,м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEX} , м/год	-	25,56	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
ΔT_B	год	0	0,0391	0,0748	0,0946	0,0646	0,0973	0,0689	0,0722	0,0613	0,0544
	хв	0	2,35	4,49	5,68	3,88	5,84	4,13	4,33	3,68	3,26
T_B ,хв	0	2,35	6,84	12,52	16,4	22,24	26,37	30,7	34,38	37,64	42,02

Перший варіант мінімального об'єму вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки четвертого геологічного інтервалу 480-490 м починається з заглиблення 480 м. Результати перевірки трьох умов лінійності в другому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 480 м, наведено в табл. 1.4.2.

Таблиця 1.4.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 480-490 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\overline{H}_B$	σ_0
480-484	0,2291	0,2537	5	191	34,12	$n'=3$	13,82	3,18	$n'=3$	2,0	0,197
480-485	-	-	6	334	21,2	$n'=4$	18,28	2,78	$n'=4$	2,5	0,203
480-486	-	-	7	668	16,26	$n'=5$	25,84	2,57	$n'=5$	3,0	0,186
480-487	-	-	8	1200	13,74	$n'=6$	34,64	2,45	$n'=6$	3,5	0,173
480-488	-	-	9	1741	12,25	$n'=7$	41,73	2,36	$n'=7$	4,0	0,173
480-489	-	-	10	1802	11,26	$n'=8$	42,45	2,31	$n'=8$	4,5	0,201
480-490	0,2313	0,1005	11	2208	10,56	$n'=9$	47	2,26	$n'=9$	5,0	0,192

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі всього інтервалу заглиблення 480-490 м, $H_B=10$ м.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 480-490 м виділено одну лінійну ділянку, яка охоплює весь інтервал.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = 0,2313 \cdot T_{Б} + 0,1005 = 0,2313 \cdot 42,02 + 0,1005 = 9,82 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 4ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,82 \text{ м} / 0,7007 \text{ год} = 14,01 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 0,7007 \text{ год} = 14,27 \text{ м} / \text{год}$.

5. П'ятий геологічний інтервал (5ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.5.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в п'ятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 490-500м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%,											
Глибина,м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0910	0,0713	0,0656	0,0951	0,0873	0,0917	0,0634	0,0517	0,0725
	хв	0	5,46	4,28	3,93	5,71	5,24	5,50	3,80	3,10	4,35
$T_{Б}$,хв	0	5,46	9,74	13,67	19,38	24,62	30,12	33,92	37,02	40,57	44,92

Результати перевірки трьох умов лінійності в п'ятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 490 м, наведено в табл. 1.5.2.

Таблиця 1.5.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 490-500 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_{Б}$	σ_0
490-494	0,212	-0,0461	5	734	34,12	n'=3	27,09	3,18	n'=3	2,0	0,1
490-495	-	-	6	1340	21,2	n'=4	36,61	2,78	n'=4	2,5	0,102
490-496	-	-	7	1847	16,26	n'=5	42,98	2,57	n'=5	3,0	0,112
490-497	-	-	8	2969	13,74	n'=6	54,49	2,45	n'=6	3,5	0,11
490-498	-	-	9	1962	12,25	n'=7	44,29	2,36	n'=7	4,0	0,163
490-499	-	-	10	1560	11,26	n'=8	39,5	2,31	n'=8	4,5	0,216
490-500	0,2195	-0,1749	11	1314	10,56	n'=9	36,2	2,26	n'=9	5,0	0,249

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_{Б}$ виконуються на протязі всього інтервалу заглиблення 490-500 м.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 490-500 м виділено одну лінійну ділянку, яка охоплює весь інтервал, $H_{Б}=10$ м. За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = 0,2195 \cdot T_{Б} - 0,1749 = 0,2195 \cdot 44,92 - 0,1749 = 9,68 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки п'ятого геологічного інтервалу за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,68 \text{ м} / 0,7487 \text{ год} = 12,93 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 0,7487 \text{ год} = 13,36 \text{ м} / \text{год}$.

6. Шостий геологічний інтервал (6ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.6.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в шостому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 500-510м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%											
Глибина,м	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.i}$, м/год	-	14,7	14,7	13,65	8,08	9,98	10,2	11,48	10,45	24,04	13,4
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0680	0,068	0,0733	0,1238	0,1002	0,0980	0,0871	0,0957	0,0746
	хв	0	4,08	4,08	4,4	7,42	6,01	5,88	5,23	5,74	4,48
$T_{Б}$,хв	0	4,08	8,16	12,56	19,98	25,99	31,87	37,1	42,84	45,34	49,82

Результати перевірки трьох умов лінійності в шостому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 500 м, наведено в табл. 1.6.2.

Таблиця 1.6.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 500-510 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
500-504	0,2026	0,1859	5	157	34,12	$n'=3$	12,52	3,18	$n'=3$	2,0	0,22
501-505	0,2148	0,14034	5	211	34,12	$n'=3$	14,52	3,18	$n'=3$	2,0	0,187
501-506	-	-	6	465	21,2	$n'=4$	21,6	2,57	$n'=4$	2,5	0,173
501-507	-	-	7	931	16,26	$n'=5$	30,6	2,45	$n'=5$	3,0	0,158
501-508	-	-	8	1677	13,74	$n'=6$	40,9	2,36	$n'=6$	3,5	0,146
501-509	-	-	9	1129	12,25	$n'=7$	33,6	2,31	$n'=7$	4,0	0,215
501-510	0,186	0,0924	10	1094	11,26	$n'=8$	33,1	2,26	$n'=8$	4,5	0,258

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 501-510 м.

В шостому геологічному інтервалі виділено одну лінійну ділянку, заглиблення свердловини від 501-510 м, $H_B=9$ м. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,1860 \cdot T_B + 0,0924 = 0,186 \cdot 45,74 + 0,0924 = 8,6$ м. Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 6ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 8,6 \text{ м} / 0,7623 \text{ год} = 11,28 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 9 \text{ м} / 0,7623 \text{ год} = 11,81 \text{ м} / \text{год}$.

7. Сьомий геологічний інтервал (7ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.7.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в сьомому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 510-520м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%											
Глибина,м	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEX} , м/год	-	9,31	7,77	8,64	15,21	16,84	15,27	18,77	18,33	14,02	11,48
ΔT_B	год	0	0,1074	0,1287	0,1157	0,0657	0,0594	0,0655	0,0533	0,0546	0,0713
	хв	0	6,44	7,72	6,94	3,94	3,56	3,93	3,20	3,27	4,28
T_B ,хв	0	6,44	14,16	21,1	25,04	28,6	32,53	35,73			

Результати перевірки трьох умов лінійності в сьомому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 510 м, наведено в табл. 1.7.2.

Таблиця 1.7.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 510-520 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
510-514	0,1529	0,0412	5	298	34,12	$n'=3$	17,26	3,18	$n'=3$	2,0	0,158
510-515	-	-	6	193,3	21,2	$n'=4$	14,52	2,57	$n'=4$	2,5	0,266
514-518	0,2849	0,0341	5	2012	34,12	$n'=3$	44,86	3,18	$n'=3$	2,0	0,061
514-519	0,2782	-0,0013	6	2604	21,2	$n'=4$	51,03	2,57	$n'=4$	2,5	0,073
514-520	0,2620	0,1022	7	868	16,26	$n'=5$	29,47	2,45	$n'=5$	3,0	0,163

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділене жирним шрифтом.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 510-520 м виділено дві лінійні ділянки: перша лінійна ділянка заглиблення свердловини 510-514 м, $H_B=4$ м; друга лінійна ділянка 514-520 м, $H_B=6$ м. За рівнянням регресії для першої лінійної ділянки сьомого геологічного інтервалу $H_{B.f} = 0,1529 \cdot T_B + 0,0997 = 0,1529 \cdot 25,04 + 0,0997 = 3,93$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 7ГІ.1: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 3,93 \text{ м} / 0,4173 \text{ год} = 9,42 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,4173 \text{ год} = 9,58 \text{ м} / \text{год}$.

За рівнянням регресії для другої лінійної ділянки сьомого геологічного інтервалу

$$H_{Б.ф} = 0,2620 \cdot T_{Б} + 0,1022 = 0,2620 \cdot 23,47 + 0,1022 = 6,25 \text{ м.}$$

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 7ГІ.2: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 6,25 \text{ м} / 0,3912 \text{ год} = 15,98 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 6 \text{ м} / 0,3912 \text{ год} = 15,34 \text{ м} / \text{год}$.

8. Восьмий геологічний інтервал (8ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.8.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в восьмому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 520-530м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 70%, пісковик сірий, різнозернистий - 30%											
Глибина,м	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.і}$, м/год	-	8,19	9,03	9,82	11,63	17,71	20,02	18,67	31,07	5,98	13,4
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,1221	0,1107	0,1018	0,0860	0,0565	0,050	0,0536	0,0322	0,1672
	хв	0	7,33	6,64	6,11	5,16	3,39	3,0	3,22	1,93	10,03
$T_{Б}$,хв	0	7,33	13,97	20,08	25,24	28,63	31,63	34,85	36,78	46,81	51,29

Результати перевірки трьох умов лінійності в восьмому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 520 м, наведено в табл. 1.8.2.

Таблиця 1.8.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 520-530 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{КР(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{КР(0,05;n')}$		$\bar{H}_{Б}$	σ_0
520-524	0,1575	-0,0983	5	703	34,12	n'=3	26,52	3,18	n'=3	2,0	0,103
520-525	0,1701	-0,2001	6	291	21,2	n'=4	17,05	2,57	n'=4	2,5	0,216
520-526	-	-	7	206	16,26	n'=5	14,4	2,45	n'=5	3,0	0,332
525-529	-	-	5	26,4	34,12	n'=3	5,14	3,18	n'=3	2,0	0,505
526-530	-	-	5	45,2	34,12	n'=3	6,72	3,18	n'=3	2,0	0,394

Значення $F_{СП}$, за якого перша умова лінійності не підтвержена, виділене жирним шрифтом.

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

Отже лінійна ділянка восьмого геологічного інтервалу – це діапазон поглиблення свердловини 520-525 м, $H_{Б}=5$ м. За рівнянням регресії для цієї ділянки- $H_{Б.ф} = 0,1701 \cdot T_{Б} - 0,2001 = 0,1701 \cdot 28,63 - 0,2001 = 4,67 \text{ м}$. Середнє значення механічної швидкості буріння на лінійній ділянці восьмого геологічного інтервалу за рівнянням регресії- $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 4,67 \text{ м} / 0,4772 \text{ год} = 9,79 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини - $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 5 \text{ м} / 0,4772 \text{ год} = 10,48 \text{ м} / \text{год}$.

9. Дев'ятий геологічний інтервал (9ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.9.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в дев'ятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 530-540м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 80%, пісковик сірий, різнозернистий - 20%											
Глибина,м	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.і}$,м/год	-	14,89	14,89	27,57	5,92	14,64	28,27	32,93	12,86	18,38	15,35
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0672	0,0672	0,0363	0,1689	0,0683	0,0354	0,0304	0,0778	0,0544
	хв	0	4,03	4,03	2,18	10,14	4,10	2,12	1,82	4,67	3,26
$T_{Б}$,хв	0	4,03	8,06	10,24	20,38	24,48	26,6	28,42	33,09	36,35	40,26

Результати перевірки трьох умов лінійності в дев'ятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 530 м, наведено в табл. 1.9.2.

Таблиця 1.9.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 530-540 м

Интервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\overline{H}_B$	σ_0
530-534	-	-	5	41,47	34,12	n'=3	6,43	3,18	n'=3	2,0	0,41
531-535	-	-	5	58,44	34,12	n'=3	7,64	3,18	n'=3	2,0	0,349
532-536	-	-	5	45,8	34,12	n'=3	6,77	3,18	n'=3	2,0	0,392
533-537			5	19,33	34,12	n'=3	4,4	3,18	n'=3	2,0	0,58
534-538	-	-	5	107,1	34,12	n'=3	10,35	3,18	n'=3	2,0	0,261
535-539	-	-	5	98,36	34,12	n'=3	9,92	3,18	n'=3	2,0	0,272
536-540	0,2801	0,2232	5	233	34,12	n'=3	15,25	3,18	n'=3	2,0	0,178

Значення $F_{СП}$, за яким перша умова лінійності не підтверджена, виділені жирним шрифтом.

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

Отже лінійна ділянка дев'ятого геологічного інтервалу-це діапазон поглиблення свердловини 536-540 м, $H_B=4$ м. За рівнянням регресії ділянки $H_{B.f} = 0,2801 \cdot T_B + 0,2232 = 0,2801 \cdot 13,66 + 0,2232 = 4,05$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння в інтервалі ділянки 9ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.f} = H_{B.f} / T_B = 4,05 \text{ м} / 0,2277 \text{ год} = 17,79 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,2277 \text{ год} = 17,57 \text{ м} / \text{год}$.

10. Десятий геологічний інтервал (10ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.10.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в десятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 540-550 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%											
Глибина, м	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.i}$, м/год	-	7,97	17,08	16,07	11,34	15,54	24,62	14,36	8,64	28,16	8,26
ΔT_B	год	0	0,1255	0,0585	0,0622	0,0882	0,0644	0,0406	0,0696	0,1157	0,0355
	хв	0	7,53	3,51	3,73	5,29	3,86	2,44	4,18	6,94	2,13
T_B , хв	0	7,53	11,04	14,77	20,06	23,92	26,36	30,54	37,48	39,61	46,87

Результати перевірки трьох умов лінійності в десятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 540м, наведено в табл. 1.10.2.

Таблиця 1.10.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 540-550 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
540-544	-	-	5	148,4	34,12	n'=3	20,06	3,18	n'=3	2,0	0,222
541-545	0,238	0,1117	5	579	34,12	n'=3	24,07	3,18	n'=3	2,0	0,113
541-546			6	497	21,2	n'=4	22,3	2,78	n'=4	2,5	0,167
541-547			7	899	16,26	n'=5	29,98	2,57	n'=5	3,0	0,161
541-548			8	628	13,74	n'=6	25,1	2,45	n'=6	3,5	0,238
541-549			9	1021	12,25	n'=7	31,96	2,36	n'=7	4,0	0,226
541-540	0,2332	0,2342	10	953	11,26	n'=8	30,87	2,31	n'=8	4,5	0,276

Третя умова лінійності не підтверджена при значенні σ_0 , яке виділене жирним шрифтом.

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 541-550 м.

За наведеним вище матеріалом в геологічному інтервалі 540-550 м виділено одну лінійну ділянку в діапазоні поглиблення 541-550 м, $H_B=9$ м. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,2332 \cdot T_B + 0,2342 = 0,2332 \cdot 39,34 + 0,2342 = 9,41$ м. Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 10ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.f} = H_{B.f} / T_B = 9,41 \text{ м} / 0,6557 \text{ год} = 14,35 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 9 \text{ м} / 0,6557 \text{ год} = 13,73 \text{ м} / \text{год}$.

11. Одинадцятий геологічний інтервал (11Г) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.11.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в одинадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 550-560м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%											
Глибина,м	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH.i}$, м/год	-	26,02	28,47	20,42	15,38	18,63	9,48	7,0	10,36	20,03	15,4
ΔT_B	год	0	0,0384	0,0351	0,0490	0,0650	0,0537	0,1055	0,1428	0,0965	0,0499
	хв	0	2,31	2,11	2,94	3,90	3,22	6,33	8,57	5,79	3,0
T_B ,хв	0	2,31	4,42	7,36	11,26	14,48	20,81	29,38	35,17	38,17	42,07

Результати перевірки трьох умов лінійності в одинадцятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 550 м, наведено в табл. 1.11.2.

Таблиця 1.11.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 550-560 м

заглубления 550-560 м											
Интервал заглубления	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\overline{H}_B$	σ_0
550-554	-	-	5	176	34,12	n'=3	13,27	3,18	n'=3	2,0	0,2
550-555	0,3382	0,2551	6	312	21,2	n'=4	17,7	2,78	n'=4	2,5	0,21
550-556	-	-	7	152	16,26	n'=5	22,3	2,57	n'=5	3,0	0,385
555-559	-	-	5	124	34,12	n'=3	11,12	3,18	n'=3	2,0	0,243
555-560	-	-	6	128	21,2	n'=4	11,3	2,78	n'=4	2,5	0,325

Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

За методикою аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин, розділ 2.3, у випадку $\sigma_0 = 0,1\bar{H}_B$, інтервал 550-554 м, потрібно збільшити об'єм вибірки на одне значення пари T_B і H_B і перевірити умови лінійності, інтервал 550-555 м. Для цього інтервалу всі умови лінійності виконуються.

За розділом 2.3, якщо до закінчення геологічного інтервалу залишається 1 м, дискретні значення пари T_B і H_B додаються до об'єму попередньої вибірки і для нової вибірки перевіряються умови лінійності, інтервал 555-560 м.

Отже в одинадцятому геологічному інтервалі 550-560 м виділено одну лінійну ділянку, заглиблення свердловини 550-555 м, $H_B=5$ м. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,3382 \cdot T_B + 0,2551 = 0,3382 \cdot 14,48 + 0,2551 = 5,15$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 11Г: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEH.f} = H_{B.f} / T_B = 5,15 \text{ м} / 0,2413 \text{ год} = 21,34 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEH} = H_B / T_B = 5 \text{ м} / 0,2413 \text{ год} = 20,72 \text{ м} / \text{год}$.

12. Дванадцятий геологічний інтервал (12Г) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.12.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в дванадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 560-570м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%											
Глибина,м	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH.i}$, м/год	-	13,32	14,52	17,41	17,5	14,34	8,15	6,36	19,26	23,34	24,44
ΔT_B	год	0	0,0751	0,0689	0,0574	0,0571	0,0697	0,1227	0,1572	0,0519	0,0428
	хв	0	4,50	4,13	3,45	3,43	4,18	7,36	9,43	3,12	2,57
T_B ,хв	0	4,5	8,63	12,08	15,51	19,69	27,05	36,48	39,6	42,17	44,62

Результати перевірки трьох умов лінійності в дванадцятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 560 м, наведено в табл. 1.12.2.

Таблиця 1.12.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 550-560 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\overline{H}_B$	σ_0
560-564	0,258	-0,1015	5	793	34,12	$n'=3$	27,44	3,18	$n'=3$	2,0	0,1
560-565	0,3382	0,2551	6	1751	21,2	$n'=4$	41,8	2,78	$n'=4$	2,5	0,09
560-556	-	-	7	352	16,26	$n'=5$	18,8	2,57	$n'=5$	3,0	0,256
560-557	-	-	8	161,3	13,74	$n'=6$	12,7	2,45	$n'=6$	3,5	0,464
556-560	0,2195	-0,4004	5	25,9	34,12	$n'=3$	5,09	3,18	$n'=3$	2,0	0,509

Значення $F_{СП}$, за яким перша умова лінійності не підтвержена, виділене жирним шрифтом. Третя умова лінійності не підтверджена при значеннях σ_0 , які виділені жирним шрифтом.

Отже в геологічному інтервалі 560-570 м виділено одну лінійну ділянку, $H_B=6$ м, заглиблення свердловини 560-566 м. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,2332 \cdot T_B + 0,0869 = 0,2332 \cdot 27,05 + 0,0869 = 6,39$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 12Г: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 6,39 \text{ м} / 0,4508 \text{ год} = 14,17 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 6 \text{ м} / 0,4508 \text{ год} = 13,31 \text{ м} / \text{год}$.

13. Тринадцятий геологічний інтервал (13ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.13.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в тринадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 570-580м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%											
Глибина,м	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXi} , м/год	-	23,49	21,39	13,6	15,51	21,26	11,91	14,01	19,64	15,92	14,86
ΔT_B	год	0	0,0426	0,0468	0,0735	0,0645	0,0470	0,0840	0,0714	0,0509	0,0628
	хв	0	2,55	2,80	4,41	3,87	2,82	5,04	4,28	3,05	3,77
T_B ,хв	0	2,55	5,35	9,76	13,63	16,45	21,49	25,77	28,82	32,59	36,63

Результати перевірки трьох умов лінійності в тринадцятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 570м, наведено в табл. 1.13.2.

Таблиця 1.13.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 570-580 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$			$\overline{H}_B$	σ_0
570-574	0,2864	0,2076	5	723,2	34,12	$n'=3$	15,27	3,18	$n'=3$	2,0	0,178	
570-575	-	-	6	534	21,2	$n'=4$	23,1	2,78	$n'=4$	2,5	0,161	
570-576	-	-	7	642	16,26	$n'=5$	25,3	2,57	$n'=5$	3,0	0,19	
570-577	-	-	8	838	13,74	$n'=6$	28,9	2,45	$n'=6$	3,5	0,206	
570-578	-	-	9	1398	12,25	$n'=7$	37,4	2,36	$n'=7$	4,0	0,193	
570-579	-	-	10	2197	11,26	$n'=8$	46,9	2,31	$n'=8$	4,5	0,182	
570-580	0,2949	0,3531	11	2422	10,56	$n'=9$	49,2	2,26	$n'=9$	5,0	0,184	

Всі три умови лінійності для вибірок значень T_B і H_B виконуються на протязі всього тринадцятого інтервалу, інтервал заглиблення 570-580 м, $H_B=10$ м.

Час буріння інтервалу 36,63 хв. За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,2649 \cdot T_B + 0,3531 = 0,2649 \cdot 36,63 + 0,3531 = 10,06$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 13ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 10,06 \text{ м} / 0,6105 \text{ год} = 16,48 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,6105 \text{ год} = 16,38 \text{ м} / \text{год}$.

14. Чотирнадцятий геологічний інтервал (14ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.14.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в чотирнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 580-590 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 100%											
Глибина,м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
ΔT_B	год	0	0,0692	0,0514	0,033	0,0431	0,0766	0,0781	0,0406	0,0354	0,0401
	хв	0	4,15	3,08	3,20	2,59	4,60	4,69	2,44	2,12	2,40
T_B ,хв	0	4,15	7,23	10,43	13,02	17,62	22,31	24,75	26,87	29,27	32,15

Результати перевірки трьох умов лінійності в тринадцятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 580 м, наведено в табл. 1.14.2.

Таблиця 1.14.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 580-590 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
580-584	0,3073	-0,1406	5	437	34,12	$n'=3$	20,9	3,18	$n'=3$	2,0	0,178
580-585	-	-	6	893	21,2	$n'=4$	29,9	2,78	$n'=4$	2,5	0,125
580-586	-	-	7	623	16,26	$n'=5$	25	2,57	$n'=5$	3,0	0,193
580-587	-	-	8	1107	13,74	$n'=6$	33,3	2,45	$n'=6$	3,5	0,18
580-588	-	-	9	1157	12,25	$n'=7$	34	2,36	$n'=7$	4,0	0,213
580-589	-	-	10	1064	11,26	$n'=8$	33	2,31	$n'=8$	4,5	0,262
580-590	0,3040	0,1894	11	873	10,56	$n'=9$	29,5	2,26	$n'=9$	5,0	0,305

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 580-590 м.

За рівнянням регресії $H_{B,f} = 0,3040 \cdot T_B - 0,1894 = 0,3040 \cdot 32,15 - 0,1894 = 9,58$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 14ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEH,f} = H_{B,f} / T_B = 9,58 \text{ м} / 0,5358 \text{ год} = 17,88 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEH} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,5358 \text{ год} = 18,66 \text{ м} / \text{год}$.

15. П'ятнадцятий геологічний інтервал (15ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.15.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в п'ятнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 590-600 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра - 95%, пісковик сірий, рівнозернистий - 5%											
Глибина,м	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	26,39	15,65	20,95	20,54	17,87	21,89	24,77	25,65	19,02	19,1
ΔT_B	год	0	0,0379	0,0639	0,0477	0,0487	0,0560	0,0457	0,0404	0,0390	0,0526
	хв	0	2,27	3,83	2,86	2,92	3,36	2,74	2,42	2,34	3,15
T_B ,хв	0	2,27	6,1	8,96	11,88	15,24	17,98	20,4	22,74	25,89	29,03

Результати перевірки трьох умов лінійності в тринадцятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 590 м, наведено в табл. 1.15.2.

Таблиця 1.15.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 590-600 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
590-594	0,3269	0,090	5	672	34,12	$n'=3$	25,9	3,18	$n'=3$	2,0	0,105
590-595	-	-	6	1489	21,2	$n'=4$	35,6	2,78	$n'=4$	2,5	0,097
590-596	-	-	7	2775	16,26	$n'=5$	52,7	2,57	$n'=5$	3,0	0,092
590-597	-	-	8	2810	13,74	$n'=6$	53,9	2,45	$n'=6$	3,5	0,113
590-598	-	-	9	2309	12,25	$n'=7$	48,0	2,36	$n'=7$	4,0	0,150
590-599	-	-	10	3280	11,26	$n'=8$	57,3	2,31	$n'=8$	4,5	0,149
590-600	0,3447	0,0292	11	4905	10,56	$n'=9$	70,0	2,26	$n'=9$	5,0	0,142

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 590-600 м.

Час буріння інтервалу 29,03 хв. За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = 0,3447 \cdot T_B - 0,0292 = 0,3447 \cdot 29,03 - 0,0292 = 9,98 м$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки п'ятнадцятого геологічного інтервалу: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 9,98 м / 0,4838 год = 20,63 м / год$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 10 м / 0,4838 год = 20,67 м / год$.

Другий етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом". Визначення статистичних характеристик вибірок дискретних значень технологічних параметрів буріння: механічної швидкості, осьового навантаження на долото, частоти обертання долота і обертового моменту ротора, для виділених лінійних ділянок

На першому етапі "Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини" в інтервалі заглиблення свердловини 450-600 м було виділено шістнадцять лінійних ділянок. В табл. 2.1 наведено емпіричні рівняння лінійної регресії функціональної залежності $H_B = f(T_B)$ для цих ділянок.

Таблиця 2.1 – Рівняння регресії лінійних ділянок та середні значення механічної швидкості за рівнянням та за інтервалом заглиблення свердловини.

Глибина свердловини та порядковий номер геологічного інтервалу (ГІ)	Позначення лінійної ділянки,	Інтервал лінійної ділянки, м	Рівняння лінійної регресії	$\bar{V}_{мех}, м / год$	
				За рівнянням	За заглибленням
450-460м 1ГІ	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.	Відс.
460-470м 2ГІ	2ГІ.1	461-465	$H_{Б.ф} = 0,4701 \cdot T_B + 0,1281$	29,12	27,94
	2ГІ.2	465-470	$H_{Б.ф} = 0,1932 \cdot T_B - 0,1172$	11,32	11,87
470-480м 3ГІ	3ГІ	475-480	$H_{Б.ф} = 0,1391 \cdot T_B - 0,1008$	8,16	8,74
480-490м 4ГІ	4ГІ	480-490	$H_{Б.ф} = 0,2313 \cdot T_B + 0,1005$	14,01	14,27
490-500м 5ГІ	5ГІ	480-490	$H_{Б.ф} = 0,2195 \cdot T_B + 0,1749$	12,93	13,36
500-510м 6ГІ	6ГІ	501-510	$H_{Б.ф} = 0,1860 \cdot T_B + 0,0924$	11,28	11,81
510-520м 7ГІ	7ГІ.1	510-514	$H_{Б.ф} = 0,1529 \cdot T_B + 0,0997$	9,42	9,58
	7ГІ.2	514-520	$H_{Б.ф} = 0,2620 \cdot T_B + 0,1022$	15,98	15,34
520-530м 8ГІ	8ГІ	520-525	$H_{Б.ф} = 0,1701 \cdot T_B - 0,2001$	9,79	10,48
530-540м 9ГІ	9ГІ	536-549	$H_{Б.ф} = 0,2801 \cdot T_B + 0,2232$	17,79	17,57
540-550м 10ГІ	10ГІ	541-550	$H_{Б.ф} = 0,2332 \cdot T_B + 0,2342$	14,35	13,73
550-560м 11ГІ	11ГІ	550-555	$H_{Б.ф} = 0,3382 \cdot T_B + 0,2551$	21,34	20,72
560-570м 12ГІ	12ГІ	560-566	$H_{Б.ф} = 0,2332 \cdot T_B + 0,0869$	14,17	13,31
570-580м 13ГІ	13ГІ	570-580	$H_{Б.ф} = 0,2649 \cdot T_B + 0,3531$	16,48	16,38
580-590м 14ГІ	14ГІ	580-590	$H_{Б.ф} = 0,3040 \cdot T_B - 0,1814$	17,88	18,66
590-600м 15ГІ	15ГІ	590-600	$H_{Б.ф} = 0,3447 \cdot T_B - 0,0292$	20,63	20,67

В табл. 2.2 наведені дискретні значення вибірок $V_{\text{мех.і}}$, $F_{\text{ДОЛ.і}}$, n_d і T_P для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-600 м заглиблення свердловини.

Таблиця 2.2 – Дискретні значення вибірок $V_{\text{мех.і}}$, $F_{\text{ДОЛ.і}}$, n_d і T_P для однорідних лінійних ділянок

Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	2ГІ.1 – 461-465
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 27,94
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	28,65; 47,42; 23,78; 22,13 - n=4
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	0,82; 0,73; 0,73; 1,44 - n=4
$n_{d.i}, \text{хв}^{-1}$	44,88; 44,16; 41,76; 44,88 - n=4
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	4,85; 2,8; 5,07; 6,73 - n=4
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	2ГІ.2 – 465-470
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 11,87
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	10,13; 11,39; 10,33; 12,34; 17,54 - n=5
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	1,47; 1,69; 1,46; 1,52; 1,89 - n=5
$n_{d.i}, \text{хв}^{-1}$	43,2; 42,48; 52,08; 51,6; 50,4 - n=5
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	3,77; 5,09; 1,49; 6,64; 1,51 - n=5
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	3ГІ – 475-480
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 8,74
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	8,65; 6,05; 8,18; 10,52; 13,5 - n=5
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	1,46; 1,84; 1,69; 1,52; 2,52 - n=5
$n_{d.i}, \text{хв}^{-1}$	47,52; 48; 46,8; 51,12; 48 - n=5
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	2,1; 4,25; 3,72; 4,94; 7,25 - n=5
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	4ГІ – 480-490
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 14,27
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	25,56; 13,37; 10,57; 15,47; 10,28; 14,52; 13,86; 16,31; 18,39; 13,7 - n=10
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	2,6; 1,95; 1,92; 2,32; 2,12; 2,0; 2,26; 2,46; 2,06; 1,3 - n=10
$n_{d.i}, \text{хв}^{-1}$	42,72; 45,12; 44,4; 45,6; 45,84; 46,56; 45,84; 46,8; 47,04; 47,76 - n=10
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	7,3; 5,1; 7,08; 7,17; 6,8; 3,74; 6,68; 5,23; 6,78; 2,11 - n=10
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	5ГІ – 490-500
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 13,36
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	10,99; 14,02; 15,25; 10,51; 11,46; 10,91; 15,78; 19,34; 16,92; 13,8 - n=10
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	2,2; 1,89; 1,55; 2,26; 2,35; 1,75; 1,95; 1,98; 2,23; 1,87 - n=10
$n_{d.i}, \text{хв}^{-1}$	45,6; 44,64; 45,84; 43,92; 54,96; 53,76; 55,92; 55,44; 51,84; 51,36 - n=10
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	6,93; 7,12; 4,73; 7,26; 3,36; 6,78; 3,69; 2,69; 7,24; 1,4 - n=10
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	6ГІ – 501-510
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 11,81
$V_{\text{мех.і}}, \text{м} / \text{год}$	14,7; 13,65; 8,08; 9,98; 10,2; 11,48; 10,45; 24,04; 13,4 - n=9
$F_{\text{ДОЛ.і}}, \text{мс}$	2,4; 2,03; 2,4; 1,98; 2,26; 2,03; 1,84; 2,0; 1,52 - n=9

Продовження табл. 2.2

$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	49,18; 52,73; 52,23; 53,49; 53,24; 52,99; 53,24; 52,99; 52,48 - n=9
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	7,09; 3,76; 7,23; 3,91; 5,82; 3,09; 3,72; 2,77; 3,84 - n=9
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	7ГІ.1 – 510-514
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 9,58
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	9,31; 7,77; 8,64; 15,21 - n=4
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	1,75; 2,09; 1,61; 1,87 - n=4
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	51,97; 51,46; 52,23; 51,21 - n=4
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	4,21; 6,88; 2,62; 7,0 - n=4
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	7ГІ.2 – 514-520
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 15,34
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	16,84; 15,27; 18,77; 18,33; 14,2; 11,48 - n=6
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	2,35; 1,98; 1,92; 1,78; 2,06; 1,81 - n=6
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	51,72; 50,7; 51,21; 52,73; 50,96; 54 - n=6
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	4,09; 4,45; 4,9; 3,71; 6,02; 3,53 - n=6
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	8ГІ - 520...525
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 10,48
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	8,19; 9,03; 9,82; 11,63; 17,71 - n=5
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	1,61; 2,26; 2,122; 14,2; 0 - n=5
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	54,25; 53,49; 52,48; 51,72; 52,23 - n=5
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	4,23; 5,62; 7,21; 6,72; 5,1 - n=5
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	9ГІ – 436-540
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 17,57
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	32,93; 12,86; 18,38; 15,35 - n=4
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	1,49; 1,1; 1,36; 1,66 - n=4
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	54,0; 50,2; 49,44; 59,58 - n=4
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	7,25; 5,5; 4,58; 7,23 - n=4
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	10ГІ – 541-550
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 13,73
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	17,08; 16,07; 11,34; 15,54; 24,62; 14,36; 8,64; 28,16; 8,26 - n=9
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	1,46; 1,43; 1,89; 0,73; 1,33; 1,15; 1,13; 2,06; 1,52 - n=9
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	60,34; 61,35; 61,35; 62,37; 62,11; 60,85; 62,87; 56,54; 63,13 - n=9
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	7,28; 7,22; 6,34; 3,34; 3,96; 6,38; 3,43; 7,3; 3,95 - n=9
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	11ГІ – 550-556
$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м} / \text{год}$	За заглибленням - 20,72
$V_{\text{мех},i}, \text{м} / \text{год}$	26,02; 28,47; 20,42; 15,38; 18,63 - n=5
$F_{\text{дол},i}, \text{мс}$	0,89; 1,3; 0,89; 1,15; 1,27 - n=5
$n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$	61,61; 63,13; 62,87; 58,82; 57,3 - n=5
$T_P, \text{кН}\cdot\text{м}$	5,42; 5,88; 4,51; 5,52; 6,13 - n=5

Продовження табл. 2.2

Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	12ГІ – 560-566
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 13,31
$V_{мех.i}, м / год$	13,32; 14,52; 17,41; 17,5; 14,34; 8,15 - n=6
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,36; 1,36; 1,98; 2,09; 1,21; 1,3 - n=6
$n_{d.i}, хв^{-1}$	65,66; 65,66; 65,41; 64,14; 66,68; 64,9 - n=6
$T_P, кН·м$	7,24; 4,15; 4,07; 5,59; 7,27; 7,32 - n=6
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	13ГІ – 570-580
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 16,38
$V_{мех.i}, м / год$	23,49; 21,39; 13,6; 15,51; 21,26; 11,91; 14,01; 19,64; 15,92; 14,86 - n=10
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,33; 1,12; 1,04; 1,21; 0,96; 1,04; 0,9; 1,6; 0,96; 1,89 - n=10
$n_{d.i}, хв^{-1}$	57,8; 53,24; 58,82; 56,79; 52,48; 58,82; 62,37; 66,42; 70,99; 69,46 - n=10
$T_P, кН·м$	7,04; 7,31; 5,99; 4,65; 3,44; 7,21; 7,16; 7,13; 3,16; 3,62 - n=10
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	14ГІ – 580-590
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 18,66
$V_{мех.i}, м / год$	14,46; 19,46; 18,76; 23,18; 13,05; 12,8; 24,6; 28,25; 24,96; 20,8 - n=10
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,21; 0,79; 1,47; 1,41; 0,38; 1,15; 1,81; 1,09; 1,98; 2,23 - n=10
$n_{d.i}, хв^{-1}$	67,18; 70,23; 67,94; 70,23; 57,3; 58,82; 59,07; 58,82; 57,3; 58,82 - n=10
$T_P, кН·м$	6,58; 4,94; 6,4; 7,31; 5,34; 7,26; 7,29; 7,29; 6,51; 3,96 - n=10
Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	15ГІ – 590-600
$\bar{V}_{мех}, м / год$	За заглибленням - 20,67
$V_{мех.i}, м / год$	26,39; 15,65; 20,95; 20,54; 17,87; 21,89; 24,77; 25,65; 19,02; 19,1 - n=10
$F_{ДОЛ.i}, тс$	1,33; 1,78; 1,27; 0,64; 1,17; 1,63; 1,11; 0,83; 0,71; 0,68 - n=10
$n_{d.i}, хв^{-1}$	59,07; 55,01; 57,04; 60,08; 54,25; 55,52; 55,27; 57,3; 55,77; 56,54 - n=10
$T_P, кН·м$	7,26; 7,3; 5,5; 2,76; 6,83; 6,52; 6,96; 6,22; 2,76; 6,2 - n=10

Таблиця 2.3 – Статистичні характеристики вибірок механічної швидкості виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення $\bar{V}_{МЕХ}$ за заглибленням свердловини

Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	$\bar{V}_{МЕХ}, м / год$ За загл.	$\bar{V}_{МЕХ}, м / год$	$D_V, (м / год)^2$	$\sigma_V, м / год$	$R_V, \%$
3ГІ – 475-480	8,74	9,38	7,834	2,7989	29,8
7ГІ.1 -510-514	9,58	10,23	11,4088	3,3777	33,0
8ГІ – 520-525	10,48	11,28	14,5524	3,8148	33,8
6ГІ – 501-510	11,81	12,89	21,9023	4,68	36,3
2ГІ.2 -465-470	11,87	12,35	9,2166	3,9359	31,9
12ГІ – 560-566	13,31	14,21	11,7385	3,4262	24,1
5ГІ – 490-500	13,36	13,97	7,9534	2,8202	20,2
10ГІ – 541-550	13,73	16,01	45,2543	6,7271	42,0
4ГІ – 480-490	14,27	15,20	19,1456	4,3756	28,8
7ГІ.2 -514-520	15,34	15,82	7,5611	2,7497	17,4
13ГІ – 570-580	16,38	17,16	15,6257	3,9529	23,0
9ГІ – 536-540	17,57	19,88	80,7846	8,988	45,2

Продовження табл. 2.2

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEX},$ м / год За загл.	$\bar{V}_{MEX},$ м / год	$D_V,$ (м / год) ²	$\sigma_V,$ м / год	$R_V,$ %
14П – 580-590	18,66	20,03	28,5811	5,3461	26,7
15П – 590-600	20,67	21,18	12,3898	3,5199	16,6
11П – 550-555	20,72	21,78	28,8664	5,3727	24,7
2П.1 -461-465	27,94	30,50	134,9747	11,6179	38,1

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень механічної швидкості буріння керуватись положеннями методики згідно якої 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 тільки при $n \geq 10$. Якщо цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$ то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки.

Таблиця 2.4 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Позначення лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX};$ n	σ_V	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta,$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX};$ n'	D'_V	σ'_V	$R_V,$ %
3П	9,38; 5	2,7989	2,13 $\alpha=0,1$	5,53	3,85-14,91 Арт. відс.	-	-	-	29,8
7П.1	10,23; 4	3,3777	2,35 $\alpha=0,1$	8,87	1,36-19,1 Арт. відс.	-	-	-	33,0
8П	11,28; 5	3,8148	2,13 $\alpha=0,1$	6,31	4,97-17,59 Арт. відс.	-	-	-	33,8
6П	12,89; 9	4,68	2,31 $\alpha=0,05$	11,4	1,49-24,29 Арт. відс.	-	-	-	36,3
2П.2	12,35; 5	3,9359	2,13 $\alpha=0,1$	9,18	3,17-21,53 Арт. відс.	-	-	-	31,9
12П	14,21; 6	3,4262	2,01 $\alpha=0,1$	7,44	6,77-21,65 Арт. відс.	-	-	-	24,1
5П	13,97; 10	2,9618	1,83 $\alpha=0,1$	5,68	8,22-19,58 Арт. відс.	-	-	-	21,3
10П	16,01; 9	6,7271	1,86 $\alpha=0,1$	13,19	2,82-29,2 Арт. відс.	-	-	-	42,0
4П	15,20; 10	4,3756	1,83 $\alpha=0,1$	8,40	6,8-23,6 Арт. 25,56	14,05; 9	6,6406	2,5769	18,3
7П.2	15,82; 6	2,7497	2,01 $\alpha=0,1$	5,97	9,85-21,79 Арт. відс.	-	-	-	17,4
13П	17,16; 10	3,9529	1,83 $\alpha=0,1$	7,59	9,57-24,75 Арт. відс.	-	-	-	23,0
9П	19,88; 4	8,988	2,35 $\alpha=0,1$	23,61	-3,73-43,49 Арт. відс.	-	-	-	45,2
14П	20,03; 10	5,3461	1,83 $\alpha=0,1$	10,26	9,77-30,29 Арт. відс.	-	-	-	26,7
15П	21,18; 10	3,5199	1,83 $\alpha=0,1$	6,76	14,42-27,94 Арт. відс.	-	-	-	16,6
11П	21,78; 5	5,3727	2,13 $\alpha=0,1$	12,54	9,24-34,32 Арт. відс.	-	-	-	24,7
2П.1	30,50; 4	11,617	2,35 $\alpha=0,1$	30,52	≈0-61 Арт. відс.	-	-	-	38,1

Прим: $\bar{V}'_{MEX}, D'_V, \sigma'_V, n'$ – статистичні характеристики і об'єм вибірок механічної швидкості без артефактів, виділені в таблиці жирним шрифтом. При відсутності артефактів

$$\bar{V}'_{MEX} \equiv \bar{V}_{MEX}, D'_V \equiv D_V, \sigma'_V \equiv \sigma_V, n' \equiv n$$

Таблиця 2.5 – Статистичні характеристики вибірок частоти обертання долота $n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Позначення і об'єм вибірки	$\bar{V}'_{\text{MEH}}$	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$D_n, (\text{хв}^{-1})^2$	$\sigma_n, \text{хв}^{-1}$	$R_n, \%$
3ГІ – 475-480	9,38	48,29	2,7475	1,6576	3,4
7ГІ.1 -510-514	10,23	51,72	0,2168	0,4656	0,9
8ГІ – 520-525	11,28	52,834	1,0416	1,0206	1,9
2ГІ.2 – 465- 470	12,35	47,952	22,2163	4,7134	9,8
6ГІ – 501-510	12,89	52,5078	1,7129	1,3088	2,5
5ГІ – 490-500	13,97	50,328	23,3222	4,8293	9,6
4ГІ – 480-490	14,05	45,768	2,0998	1,4491	3,2
12ГІ – 560-566	14,21	65,4083	0,7222	0,8498	1,3
7ГІ.2 -514-520	15,82	51,8867	1,586	1,2594	2,4
10ГІ – 541-550	16,01	61,2122	3,9165	1,979	3,2
13ГІ – 570-580	17,16	60,719	41,3458	6,4301	10,6
9ГІ – 536-540	19,88	53,305	21,4793	4,6346	8,7
14ГІ – 580-590	20,03	62,571	30,8248	5,552	8,9
15ГІ – 590-600	21,18	56,587	3,3966	1,843	3,2
11ГІ – 550-555	21,78	60,746	6,6314	2,5752	4,2
2ГІ.1 -461-465	30,50	43,92	2,1888	1,4795	3,4

Таблиця 2.6 – Статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото $F_{\text{дол},i}, \text{тс}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Позначення і інтервал лінійної ділянки,м	$\bar{V}'_{\text{MEH}}$	$\bar{F}_{\text{дол}}, \text{тс}$	$D_F, (\text{тс})^2$	$\sigma_F, \text{тс}$	$R_F, \%$
3ГІ – 475-480	9,38	1,806	0,1815	0,426	23,6
7ГІ.1 -510-514	10,23	1,83	0,0413	0,2033	11,1
8ГІ – 520-525	11,28	2,026	0,0626	0,2502	12,3
2ГІ.2 – 465-470	12,35	1,606	0,0337	0,1837	11,4
6ГІ – 501-510	12,89	2,0511	0,0778	0,2789	13,6
5ГІ – 490-500	13,97	2,003	0,0644	0,2538	17,8
4ГІ – 480-490	14,05	2,099	0,1289	0,3591	17,1
12ГІ – 560-566	14,21	1,55	0,1454	0,3813	24,6
7ГІ.2 -514-520	15,82	1,9833	0,0431	0,2077	10,5
10ГІ – 541-550	16,01	2,009	0,1289	0,3591	17,1
13ГІ – 570-580	17,16	1,205	0,1017	0,319	26,5
9ГІ – 536-540	19,88	1,4025	0,0558	0,2361	16,8
14ГІ – 580-590	20,03	1,352	0,3092	0,556	41,1
15ГІ – 590-600	21,18	1,115	0,1601	0,4001	35,9
11ГІ – 550-555	21,78	1,1	0,0399	0,1997	18,2
2ГІ.1 – 461-465	30,50	0,93	0,1174	0,3426	36,8

За методикою аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин (розділ 2.3) режимні параметри буріння, до яких відносяться осьове навантаження на долото і частота його обертання – це зовнішні незалежні чинники (фактори) будь-яких експериментальних досліджень процесу руйнування породи і для вибірок їх дискретних значень визначення артефактів не проводиться.

Таблиця 2.7 – Статистичні характеристики вибірок обертового моменту ротора $T_{p,i}, \kappa H \cdot m$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

П-вий номер лінійної ділянки (ЛД)	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$ $T_{p.MIH} - T_{p.MAX}$	$D_T,$ $(\kappa H \cdot m)^2$	$\sigma_T,$ $\kappa H \cdot m$	$R_T,$ %
3ГІ	5	9,38	4,45 2,1-7,25	3,5438	1,8825	42,3
7ГІ.1	4	10,23	5,18 2,68-7,0	4,5655	2,1367	41,2
8ГІ	5	11,28	5,78 4,23-7,21	1,4547	1,2061	20,9
2ГІ.2	5	12,35	3,7 1,49-6,64	5,0652	2,2506	60,8
6ГІ	9	12,89	4,58 2,77-7,23	2,8456	1,6869	36,8
5ГІ	10	13,97	5,12 1,4- 7,26	4,9049	2,2147	43,2
4ГІ	10	14,05	5,8 2,11-7,3	3,0192	1,7376	30,0
12ГІ	6	14,21	5,94 4,07-7,32	2,4373	1,5612	26,3
7ГІ.2	6	15,82	4,45 3,53-6,02	0,8381	0,9155	20,6
10ГІ	9	16,01	5,47 3,34-7,3	3,0702	1,7522	32,0
13ГІ	10	17,16	5,67 3,16-7,31	3,1008	1,7609	31,0
9ГІ	4	19,88	6,14 4,58-7,25	1,7546	1,3246	21,6
14ГІ	10	20,03	6,29 3,96-7,31	1,3644	1,1681	18,6
15ГІ	10	21,18	5,83 2,76-7,3	2,9118	1,7064	29,3
11ГІ	5	21,78	5,49 4,51-6,13	0,3819	0,618	11,2
2ГІ.1	4	30,50	4,86 2,8-6,73	2,5950	1,6109	33,1

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень обертового моменту керуватись положеннями методики згідно якої 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 тільки при $n \geq 10$. Якщо цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$ то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки.

Таблиця 2.8 – Визначення артефактів для вибірок значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

П-ня лінійної ділянки	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$ $T_{p.MIH} - T_{p.MAX}$	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{T}_p - \Delta,$ $\bar{T}_p + \Delta$	$\bar{T}'_p,$ $\kappa H \cdot m$	σ'_T	$R_T,$ %
3ГІ	5	9,38	4,45 2,1-7,25	2,13 $\alpha=0,1$	4,39	0,06-8,84 Арт. відс.	4,45	1,8825	42,3
7ГІ.1	4	10,23	5,18 2,68-7,0	2,35 $\alpha=0,1$	5,61	-0,43-10,8 Арт. відс.	5,18	2,1367	41,2

Таблиця 2.8 Визначення артефактів для вибірок значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

П-ня лінійної ділянки	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} - T_{P.MAX}$	t_{kr} і α	Δ	$\bar{T}_P - \Delta,$ $\bar{T}_P + \Delta$	$\bar{T}'_P, n'$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	σ'_T	$R_T,$ %
8ГІ	5	11,28	5,78 4,23-7,21	2,13 $\alpha=0,1$	2,81	2,97-8,59 Арт. відс.	-	-	20,9
2ГІ.2	5	12,35	3,7 1,49-6,64	2,13 $\alpha=0,1$	5,25	-1,55-8,95 Арт. відс.	-	-	60,8
6ГІ	9	12,89	4,58 2,77-7,23	1,86 $\alpha=0,1$	3,31	1,27-7,89 Арт. відс.	-	-	36,8
5ГІ	10	13,97	5,12 1,4-7,26	1,83 $\alpha=0,1$	4,25	0,87-9,37 Арт. відс.	-	-	43,2
4ГІ	10	14,05	5,8 2,11-7,3	1,83 $\alpha=0,1$	3,34	2,46-9,14 Арт. 2,11	6,21;9 3,74-7,3	1,2275	19,8
12ГІ	6	14,21	5,94 4,07-7,32	2,01 $\alpha=0,1$	3,39	2,55-9,33 Арт. відс.	-	-	26,3
7ГІ.2	6	15,82	4,45 3,53-6,02	2,01 $\alpha=0,1$	1,99	2,46-6,44 Арт. відс.	-	-	20,6
10ГІ	9	16,01	5,47 3,34-7,3	1,86 $\alpha=0,1$	3,44	2,03-8,91 Арт. відс.	-	-	32,0
13ГІ	10	17,16	5,67 3,16-7,31	1,83 $\alpha=0,1$	3,38	2,29-9,05 Арт. відс.	-	-	31,0
9ГІ	4	19,88	6,14 4,58-7,25	2,35 $\alpha=0,1$	3,48	2,66-9,62 Арт. відс.	-	-	21,6
14ГІ	10	20,03	6,29 3,96-7,31	1,83 $\alpha=0,1$	2,24	4,05-8,53 Арт. 3,96	6,55;9 4,94-7,31	0,8844	13,5
15ГІ	10	21,18	5,83 2,76-7,3	1,83 $\alpha=0,1$	3,28	2,55-9,11 Арт. відс.	-	-	29,3
11ГІ	5	21,78	5,49 4,51-6,13	2,13 $\alpha=0,1$	1,44	4,05-6,93 Арт. відс.	-	-	11,2
2ГІ.1	4	30,50	4,86 2,8-6,73	2,35 $\alpha=0,1$	4,23	0,63-9,09 Арт. відс.	-	-	33,1

Прим: $\bar{T}'_P, \sigma'_T, n'$ – статистичні характеристики і об'єм вибірок механічної швидкості без артефактів, виділені в таблиці жирним шрифтом. При відсутності артефактів

$$\bar{T}'_P \equiv \bar{T}_P, \sigma'_T \equiv \sigma_T, n' \equiv n$$

Третій етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом".

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 аналізованої величини поглиблення свердловини

Перевірка параметричних нульових гіпотез проводиться тільки для вибірок дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння, які відносяться до однорідних лінійних ділянок заглиблення з однаковими літологічними характеристиками розбуреної породи, табл. 3.1. Для значень вибірок, які відносяться до породи з однаковими літологічними характеристиками, проводиться перевірка закону їх розподілу. Експрес-метод підтвердження нормального закону розподілу дискретних значень вибірок технологічних параметрів процесу буріння полягає у перевірці умов $A < 3 \cdot \sigma_A; E < 3 \cdot \sigma_E$. Якщо нерівності підтверджуються, то дискретні значення вибірки розподіляються за нормальним законом; якщо одна з умов не виконується, то нормальний закон розподілу відхиляється і для цих вибірок перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться.

Таблиця 3.1 – Літологічні характеристики породи на однорідних лінійних ділянках і середні значення вибірок технологічних параметрів

Позначення ГІ і інтервал заглиблення	Літологічні Характеристики породи	Середні значення вибірок технологічних параметрів			
		$\bar{V}_{MEH}, м / год$	$\bar{n}_d, хв^{-1}$	$\bar{F}_{ДОЛ}, тс$	$\bar{T}_P, кН \cdot м$
8ГІ – 520-525м	Глина сіра - 70%, пісковик сірий, різнозернистий - 30%	11,28	51,72	2,026	5,78
9ГІ – 536-540м	Глина сіра - 80%, пісковик сірий, різнозернистий - 20%	19,88	53,05	1,4025	6,14
2ГІ – 460-470м	Глина сіра - 85%, пісок світло-сірий, кварцевий - 15%	30,5 (460-465м)	43,92	0,93	4,86
		12,35 (465-470м)	47,95	1,606	3,7
6ГІ – 501-510м	Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%	12,89	52,51	2,0511	4,58
11ГІ – 550-555м		21,78	60,75	1,1	5,49
10ГІ – 541-550м		16,01	61,2122	2,009	5,47
3ГІ – 475-480м	Глина сіра - 95%, пісок світло-сірий, кварцевий - 5%	9,38	48,29	1,806	4,45
7ГІ – 510-520м	Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%	10,23 (510...514м)	51,72	1,83	5,18
		15,82 (514...520м)	51,89	1,9833	4,45
12ГІ – 560-566м	Глина сіра - 100%,	14,21	65,41	1,55	5,94
13ГІ – 570-580м		17,16	60,72	1,205	5,67
15ГІ – 590-600м		21,18	56,59	1,115	5,83
4ГІ – 480-490м		14,05	45,77	2,099	6,21
5ГІ – 490-450м		13,97	50,33	2,003	5,12
14ГІ – 580-590м		20,03	62,57	1,352	6,55

Таблиця 3.2 – Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $V_{mex.i}$ нормальному закону (закону Гаусса)

Позначення та об'єм вибірки	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_V	$M_{3,V}$	$M_{4,V}$	A_V , $3\sigma_A$	E_V , $3\sigma_E$
Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%									
6ГІ - $n=9$	12,8867 12,89	185,5348	3028,446	55771,87	4,6799 4,68	135,764	1797,67	1,325 1,897	0,748 2,754
10ГІ - $n=9$	16,0078 16,01	296,475	6196,353	141737,4	6,7271 6,7271	162,602	3815,5	0,534 1,897	-1,137 2,754
11ГІ - $n=5$	21,784 21,78	497,5353	11862,28	293129	5,3727 5,3611	22,228	535,509	0,143	-2,357 2,25
Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%									
7ГІ.1 - $n=4$	10,2325 10,23	113,2606	1359,942	17552,57	3,3777 3,3777	25,893	154,391	0,672	-1,814 1,74

Продовження табл. 3.2

Позначення і об'єм вибірки	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_V	$M_{3,V}$	$M_{4,V}$	$A_V,$ $3\sigma_A$	$E_V,$ $3\sigma_E$
Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%									
7ГІ.2 - $n=6$	15,8149 15,82	256,4151	4247,326	71838,44	2,7497 2,7504	-7,249	281,84	-0,349 2,07	1,930 2,52
12ГІ - $n=6$	14,2066 14,21	211,6114	3258,527	51381,6	3,4265 3,4262	-25,744	262,22	-0,64 2,07	-1,098 2,52
13ГІ - $n=10$	17,159 17,16	308,4943	5793,499	113059,9	3,9529 3,9529	17,431	330,196	0,282 1,842	-1,648 2,766
15ГІ - $n=10$	21,183 21,18	459,8703	10219,01	232048	3,5199 3,5199	5,162	239,90	0,118 1,842	-1,437 2,766
Глина сіра - 100%									
4ГІ - $n=9$	14,0522 14,05	203,3676	3023,64	46066,28	2,5770 2,5769	-0,03	81,7	-0,002 2,754	-1,147 2,754
5ГІ - $n=10$	13,898 13,9	201,0493	3022,955	47106,13	2,9618 2,9618	9,325	129,49	0,359 1,842	-1,324 2,766
14ГІ - $n=10$	20,032 20,03	427,0039	9575,088	223396,8	5,3461 5,3461	-9,215	1176,142	-0,060 1,842	-1,560 2,766

При перевірці нульової гіпотези про нормальний закон розподілу дискретних значень механічної швидкості буріння за вибірками виділених лінійних ділянок ця гіпотеза відхиляється для вибірок, виділених жирним косим шрифтом в табл. 3.2. Всі ці вибірки належать до різних генеральних сукупностей.

Таблиця 3.3 – Перевірка нульових гіпотез $D_{V,j} = D_{V,k}$ та альтернативної $D_{V,j} \neq D_{V,k}$, $\alpha=0,01$

Позначення	$\bar{V}_{MEX},$ $m / год$	$D_V,$ $(m / год)^2$	n	$F_{СП}$	$F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{V,j} = D_{V,k}$
Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%						
6ГІ	12,89	21,9015	9	2,07	6,03	Підтверджена
10ГІ	16,01	45,2539	9			
Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%						
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	1,55	10,97	Підтверджена
12ГІ	14,21	11,7409	6			
12ГІ	14,21	11,7409	6	1,33	10,15	Підтверджена
13ГІ	17,16	15,6254	10			
12ГІ	14,21	11,7409	6	1,06	10,15	Підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	2,07	10,15	Підтверджена
13ГІ	17,16	15,6254	10			
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	1,64	10,15	Підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
13ГІ	17,16	15,6254	10	1,26	5,35	Підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
Глина сіра - 100%						
5ГІ	13,9	8,7723	10	1,32	5,91	Підтверджена
4ГІ	14,05	6,6409	9			
5ГІ	13,9	8,7723	9	1,32	5,91	Підтверджена
14ГІ	20,03	28,5808	10			
4ГІ	14,05	6,6409	9	4,304	5,91	Підтверджена
14ГІ	20,03	28,5808	10			

В табл. 3.4 наведено результати перевірки нульової $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$ та альтернативної гіпотез $\bar{V}_{MEX.j} \neq \bar{V}_{MEX.k}$ при рівні значущості $\alpha=0,05$.

Таблиця 3.4 – Перевірка нульової $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$ та альтернативної - $\bar{V}_{MEX.j} \neq \bar{V}_{MEX.k}$ гіпотез, $\alpha=0,05$

Позначення	$\bar{V}_{MEX},$ $m / год$	$D_V,$ $(m / год)^2$	n	$T_{СП}$	$T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$
Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%						
6ГІ	12,89	21,9015	9	1,15	2,12	Підтверджена
10ГІ	16,01	45,2539	9			
Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%						
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	0,9	2,23	Підтверджена
12ГІ	14,21	11,7409	6			
12ГІ	14,21	11,7409	6	1,51	2,14	Підтверджена
13ГІ	17,16	15,6254	10			
12ГІ	14,21	11,7409	6	3,87	2,14	Не підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	0,73	2,14	Підтверджена
13ГІ	17,16	15,6254	10			
7ГІ.2	15,82	7,5608	6	3,18	2,14	Не підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
13ГІ	17,16	15,6254	10	2,4	2,1	Не підтверджена
15ГІ	21,18	12,3897	10			
Глина сіра - 100%						
5ГІ	13,9	8,7723	10	0,12	2,11	Підтверджена
4ГІ	14,05	6,6409	9			
5ГІ	13,9	8,7723	9	3,0	2,11	Не підтверджена
14ГІ	20,03	28,5808	10			
4ГІ	14,05	6,6409	9	3,05	2,11	Не підтверджена
14ГІ	20,03	28,5808	10			

За табл. 3.4 до однієї генеральної сукупності належать вибірки дискретних значень механічної швидкості 6ГІ та 10ГІ, порода - глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%; вибірки 7ГІ.2, 12ГІ та 13ГІ, порода - глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%; вибірки 5ГІ і 4ГІ, порода - глина сіра - 100%.

Для підтвердження або заперечення належності до однієї ГС вибірок дискретних значень механічної швидкості за всіма наведеними вище варіантами (див. табл. 3.4), проводимо перевірку нульових гіпотез $D_{n,j} = D_{n,k}$, $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, для вибірок дискретних значень частоти обертання долота. Цей етап виконується тільки для вибірок, значення яких розподіляються за нормальним законом. Експрес-метод підтвердження нормального закону розподілу дискретних значень вибірок технологічних параметрів процесу буріння полягає у перевірці умов $A_n < 3 \cdot \sigma_{A.n}$; $E_n < 3 \cdot \sigma_{E.n}$. Якщо нерівності підтверджуються дискретні значення вибірки розподіляються за нормальним законом, якщо одна з умов не виконується, нормальний закон розподілу відхиляється і для цих вибірок перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться.

Таблиця 3.5 – Перевірка відповідності розподілу дискретних значень $\bar{n}_{d.i}$ нормальному закону (закону Гаусса)

Позначення і об'єм вибірки	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_n	$M_{3,n}$	$M_{4,n}$	$A_n,$ $3\sigma_{A.n}$	$E_n,$ $3\sigma_{E.n}$
Глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%									
6ГІ - $n=9$	52,5188 52,51	2759,713	145098	7632529	1,2941 1,3088	4,481	2,068 1,89	-921,491	-331,56 2,754
10ГІ - $n=9$	61,2122 61,21	3750,416	229987,6	14115433	1,9794 1,979	-9,966	-1,285 1,89	69,2602	-1,512 2,754

Продовження табл. 3.5

Позначення і об'єм вибірки	m_1	m_2	m_3	m_4	σ_n	$M_{3,n}$	$M_{4,n}$	$A_n, 3\sigma_{A,n}$	$E_n, 3\sigma_{E,n}$
Глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%									
7ГІ.2 - $n=6$	51,8866 51,89	2693,547	139897,5	7269685	1,2593 1,2594	0,72	43,5414	0,36 2,07	14,314 2,52
12ГІ - $n=6$	65,4083 65,41	4278,851	279951,2	18318865	0,8523 0,8498	-0,35	33,241	-0,56 2,07	60 2,52
13ГІ - $n=10$	60,719 60,72	3724,007	230732,3	14439214	6,4299 6,4301	95,6	406,55	0,36 1,842	-2,762 2,766
Глина сіра - 100%									
5ГІ - $n=10$	50,328 50,33	2553,897	130626,2	6731371	4,8292 4,8293	-19,039	597,419	0,169 1,842	-1,902 2,766
4ГІ - $n=10$	45,768 45,77	2096,599	96128,2	4411213	1,4492 1,4491	-1,871	2,563	-0,615 1,842	-2,419 2,766

При перевірці нульової гіпотези про нормальний закон розподілу дискретних значень частоти обертання за вибірками виділених лінійних ділянок ця гіпотеза відхиляється для вибірок виділених жирним косим шрифтом в табл. 3.5. Всі ці вибірки належать до різних генеральних сукупностей.

Для підтвердження або заперечення належності до однієї ГС вибірок дискретних значень механічної швидкості за всіма наведеними вище варіантами (див. табл. 3.4), проводимо перевірку нульових гіпотез $D_{n,j} = D_{n,k}$, $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, для вибірок дискретних значень частоти обертання долота. Цей етап виконується тільки для вибірок, значення яких розподіляються за нормальним законом.

Таблиця 3.6 – Перевірка нульових $D_{n,j} = D_{n,k}$, $\alpha = 0,01$; $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, $\alpha = 0,05$ та альтернативних
$$D_{n,j} \neq D_{n,k}, \alpha = 0,01 \quad \bar{n}_j \neq \bar{n}_k, \alpha = 0,05 \text{ гіпотез}$$

№ виб	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$D_n, (\text{хв}^{-1})^2$	N	$F_{СП} < F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{n,x} = D_{n,y}$	Перевірка умови $T_{СП} < T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{n}_{d,x} = \bar{n}_{d,y}$
5ГІ	50,328	23,3222	10	11,11 > 5,35	Не підтверджена	Не підтверджена $D_{n,j} \neq D_{n,k}$	
4ГІ	45,768	2,0998	10		Не підтверджена		

Вибірки 8ГІ, 2ГІ.1, 2ГІ.2, 9ГІ і 3ГІ відносяться до породи з різними літологічними характеристиками і для цих вибірок тест перевірки закону розподілу і перевірка параметричних нульових гіпотез не проводиться.

Для вибірок 6ГІ, 11ГІ і 10ГІ - глина сіра - 90%, пісковик сірий, різнозернистий - 10%, вибірок 7ГІ, 7ГІ.2, 12ГІ, 13ГІ і 15ГІ - глина сіра - 95%, пісковик сірий, різнозернистий - 5%, і вибірок 4ГІ, 5ГІ і 14ГІ - глина сіра - 100% тест перевірки закону розподілу і перевірка параметричних нульових гіпотез проводиться. За тестом перевірки закону розподілу нормальний закон розподілу відхиляється для вибірок 11ГІ, 7ГІ.1, 7ГІ.2, 6ГІ і 12ГІ. За результатами перевірки параметричних статистичних гіпотез про рівність вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння і частоти обертання долота, вибірки 10ГІ, 13ГІ, 14ГІ, 15ГІ, 5ГІ, 4ГІ, всі виділені лінійні ділянки за технологічними параметрами належать до різних генеральних сукупностей.

В табл. Д2 наведено результати виділення однорідних лінійних ділянок в інтервалі заглиблення 450-600 м і відповідні цим ділянкам результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння.

Таблиця 3.7 – Однорідні лінійні ділянки і результати статистичного аналізу вибірок значень технологічних параметрів процесу буріння в діапазоні заглиблення 450-600 м закінченої свердловини Ужгородська 104 в порядку зростання середнього вибірок значень механічної швидкості буріння

Позначення вибірки, інтервал заглиблення свердловини, м	Об'єм вибірки n	$\bar{V}_{MEH}$	$\bar{n}_d, хв^{-1}$	$\bar{F}_{ДОЛ}, тс$	$\bar{T}_P, кН \cdot м$	$T_{P.MIH} \dots T_{P.MAX}$
3ГІ - 475-480	5	9,38	48,29	1,806	4,45	2,1-7,25
7ГІ.1 - 510-514	4	10,23	51,72	1,83	5,18	2,68-7,0
8ГІ – 520-525	5	11,28	52,834	2,026	5,78	4,23-7,0
2ГІ.2 – 465-470	5	12,35	47,952	1,606	3,7	1,49-6,64
6ГІ – 501-510	9	12,89	52,5078	2,0511	4,58	2,77-7,89
5ГІ – 490-500	10	13,97	50,328	2,003	5,12	1,4-7,26
4ГІ – 480-490	10	14,05	45,768	2,099	6,21	3,74-7,34
12ГІ – 560-566	6	14,21	65,4083	1,55	5,94	4,07-7,32
7ГІ.2 - 514-520	6	15,82	51,8867	1,9833	4,45	3,53-6,02
10ГІ – 541-550	9	16,01	61,2122	2,009	5,47	3,14-7,3
13ГІ – 570-580	13	17,16	60,719	1,205	5,67	3,16-7,31
9ГІ – 536-540	4	19,88	53,305	1,4025	6,14	4,58-7,25
14ГІ – 580-590	10	20,03	62,571	1,352	6,55	4,94-7,31
15ГІ – 590-600	10	21,18	56,587	1,115	5,83	2,76-7,3
11ГІ – 550-555	5	21,78	60,746	1,1	5,49	4,51-6,13
2ГІ.1 - 461-465	4	30,50	43,92	0,93	4,86	2,8-6,73

Додаток Д

Приклад застосування методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин, бур. Ужгородська 104, розподіл діапазону поглиблення на інтервали геологічних досліджень проводився за геологічним журналом і постійними літологічними характеристиками породи, інтервали складені на 100% глиною сірою (аргіліт)

Одним із головних завдань буріння свердловин є визначення витрати енергії на руйнування гірської породи. Ця витрата називається енергоємністю процесу буріння. Порівняльна оцінка впливу різних факторів на енергоємність процесу руйнування гірських порід здійснюється за величиною питомої об'ємної роботи W_{Π} , яка витрачається на руйнування 1см^3 гірської породи. Ця робота визначається за формулою

$$W_{\Pi} = \frac{W}{V}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^3; \quad (3.1)$$

де W – загальна робота під час руйнування породи; V – об'єм зруйнованої породи.

$$W = P \cdot t_{\theta}, \text{Н} \cdot \text{м} (\text{Дж}); \quad (3.2)$$

де P – потужність на долоті, яка витрачається на руйнування гірської породи; t_{θ} – час буріння, с.

$$P = T_{CP} \cdot \omega_{\theta} = T_{CP} \cdot \frac{\pi \cdot n_{\theta}}{30}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{с}; \quad (3.3)$$

де T_{CP} – середнє значення обертового моменту на долоті (моментоеємність), $\text{кГ} \cdot \text{м}$; n_{θ} – частота обертання долота, хв^{-1} .

$$V = H_B \cdot A, \text{см}^3; \quad (3.4)$$

де A – площа вибою, см^2 .

Заглиблення долота H_B за час буріння t_{θ} (проходка на долото) визначається за формулою

$$H_B = v_m \cdot t_{\theta}, \text{см}; \quad (3.5)$$

де v_m – механічна швидкість буріння, см/с .

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \text{см}^2; \quad (3.6)$$

де D – діаметр свердловини. Орієнтовно $D \cong d_{\theta}, \text{см}$, де d_{θ} – діаметр долота, см .

Підставляємо рівняння (3.2)-(3.6) в (3.1)

$$W_{\Pi} = \frac{P \cdot t_{\theta}}{H_B \cdot A} = \frac{T_{CP} \cdot \omega_{\theta} \cdot t_{\theta}}{v_m \cdot t_{\theta} \cdot A} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\theta} \cdot t_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\theta} \cdot \pi \cdot d_{\theta}^2} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot n_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot d_{\theta}^2}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^3. \quad (3.7)$$

Перехід від механічної швидкості від розмірності см/с до м/год

$$1\text{м} = 100\text{см} \rightarrow 1\text{см} = 10^{-2}\text{м} \rightarrow 1\text{см} = \frac{1}{100}\text{м}, 1\text{год} = 3600\text{с} \rightarrow 1\text{с} = \frac{1}{3600}\text{год}.$$

$$v_m = 1\text{см} / \text{с} = \frac{\text{м} \cdot 3600}{100 \cdot \text{год}} = 36\text{м} / \text{год}.$$

$$\begin{aligned} W_{\Pi} &= \frac{P \cdot t_{\theta}}{H_B \cdot A} = \frac{T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\theta} \cdot t_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\theta} \cdot A} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\theta} \cdot t_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\theta} \cdot \pi \cdot d_{\theta}^2} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot n_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot d_{\theta}^2}, \text{кГ} \cdot \text{м} / \text{см}^3 \rightarrow \\ W_{\Pi} &= \frac{P \cdot t_{\theta}}{H_B \cdot A} = \frac{T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\theta} \cdot t_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\theta} \cdot A} = \frac{4 \cdot T_{CP} \cdot \pi \cdot n_{\theta} \cdot t_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot t_{\theta} \cdot \pi \cdot d_{\theta}^2} = \frac{36 \cdot 10 \cdot 4 \cdot T_{CP} \cdot n_{\theta}}{30 \cdot v_m \cdot d_{\theta}^2} = \\ &= 48 \frac{T_{CP} \cdot n_{\theta}}{v_m \cdot d_{\theta}^2}, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3; n_{\theta}, \text{хв}^{-1}; v_m, \text{м} / \text{год}; d_{\theta}^2, \text{см}^2. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Приклад визначення енергоємності процесу руйнування породи в інтервалі поглиблення 480-481 м

$$W_{II} = 48 \frac{T_{CP} \cdot n_o}{v_m \cdot D^2} = 48 \frac{7,3 \cdot 10^3 \cdot 42,75}{25,56 \cdot 21,59^2} = \frac{102,9760 \cdot 7,3 \cdot 42,75}{25,56} = 1257 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{см}^3$$

Таблиця Дк3.1 – Значення технологічних параметрів в інтервалах поглиблення закінченої свердловини з літологічними характеристиками породи, глина сіра 100%

№	Інтервал проведення геологічних досліджень, м	Нав'язання на долото $F_{д,тс}$	Обертний момент ротора $T_{об,р,кН \cdot м}$	Частота обертання ротора $n_{р,хв^{-1}}$	Частота обертання долота $n_{д,хв^{-1}}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех,м/год}$	W_{II} , Н·м/см ³
1	ІГІ - 481	2,6	7,3	42,72	42,72	25,56	1257
2	482	1,95	5,1	45,12	45,12	13,37	1772
3	483	1,92	7,08	44,40	44,40	10,57	3062
4	484	2,32	7,17	45,60	45,60	15,47	2176
5	485	2,12	6,80	45,84	45,84	10,28	3122
6	486	2,00	3,74	46,56	46,56	14,52	1235
7	487	2,26	6,68	45,84	45,84	13,86	2275
8	488	2,46	5,23	46,80	46,80	16,31	1545
9	489	2,06	6,78	47,04	47,04	18,39	1786
10	ІГІ - 490	1,3	2,11	47,76	47,76	13,70	757
11	2ГІ - 491	2,20	6,93	45,60	45,60	10,99	2961
12	492	1,89	7,12	44,64	44,64	14,02	2334
13	493	1,55	4,73	45,84	45,84	15,25	1464
14	494	2,26	7,26	43,92	43,92	10,51	3124
15	495	2,35	3,36	54,96	54,96	11,46	1659
16	496	1,75	6,78	53,76	53,76	10,91	3440
17	497	1,95	3,69	55,92	55,92	15,78	1346
18	498	1,98	2,69	55,44	55,44	19,34	794
19	499	2,23	7,24	51,84	51,84	16,92	2284
20	2ГІ - 500	1,87	1,4	51,36	51,36	13,80	536
21	3ГІ - 581	1,21	6,58	67,18	67,18	14,46	3148
22	582	0,79	4,94	70,23	70,23	19,46	1836
23	583	1,47	6,4	67,94	67,94	18,76	2387
24	584	1,41	7,31	70,23	70,23	23,18	2281
25	585	0,38	5,34	57,3	57,3	13,05	2414
26	586	1,15	7,26	58,82	58,82	12,8	3435
27	587	1,81	7,29	59,07	59,07	24,6	1802
28	588	1,09	7,29	58,82	58,82	28,25	1563
29	589	1,98	6,51	57,3	57,3	24,96	1539
30	3ГІ - 590	2,23	3,96	58,82	58,82	20,8	1153
31	4ГІ - 611	1,31	6,35	55,01	55,01	14,13	2546
32	612	1,22	4,70	56,28	56,28	15,55	1752
33	613	1,88	6,77	53,24	53,24	13,55	2739
34	614	1,57	6,02	51,97	51,97	14,00	2301
35	615	1,60	6,20	56,79	56,79	16,24	2233
36	616	1,66	3,07	60,08	60,08	12,34	1539
37	617	0,68	1,19	61,10	61,10	24,30	308
38	618	1,00	5,34	59,32	59,32	18,87	1729
39	619	1,99	4,88	58,06	58,06	21,84	1336
40	4ГІ - 620	0,71	3,43	59,07	59,07	19,31	1080
41	5ГІ - 621	1,09	5,14	59,32	59,32	12,87	2440
42	622	0,88	3,59	61,61	61,61	11,82	1927
43	623	1,39	5,22	59,32	59,32	10,80	2952
44	624	2,62	4,65	48,17	48,17	13,32	1732
45	625	2,23	6,61	45,63	45,63	12,78	2430
46	626	2,08	4,86	43,61	43,61	10,33	2113

Продовження таблиці Дк3.1

№	Інтервал проведення геологічних досліджень,м	Навтаження 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	W_{II} , Н·м/см ³
47	627	2,17	6,84	45,13	45,13	12,85	2474
48	628	1,69	4,84	46,39	46,39	9,74	2374
49	629	1,69	3,91	46,90	46,90	11,72	1611
50	5ГІ - 630	1,54	2,31	47,92	47,92	8,90	1281
51	6ГІ - 631	2,17	6,81	44,37	44,37	8,75	3556
52	632	1,89	5,26	58,56	58,56	11,16	2842
53	633	2,17	7,33	58,06	58,06	15,89	2758
54	634	2,14	5,19	58,82	58,82	15,88	1980
55	635	2,53	4,52	59,83	59,83	18,06	1542
56	636	1,21	3,14	59,32	59,32	17,67	1086
57	637	1,51	6,10	58,06	58,06	13,57	2688
58	638	2,20	7,30	55,52	55,52	16,47	2534
59	639	1,60	4,62	59,83	59,83	10,36	2747
60	6ГІ - 640	1,77	2,06	60,08	60,08	8,30	1536
61	7ГІ - 641	1,80	3,46	59,07	59,07	8,71	2416
62	642	1,54	5,36	59,07	59,07	13,20	2470
63	643	1,23	4,73	56,54	56,54	10,17	2708
64	644	1,69	5,97	57,04	57,04	19,04	1842
65	645	1,74	3,68	58,82	58,82	8,11	2748
66	646	1,26	2,14	58,82	58,82	6,64	1952
67	647	1,77	6,11	57,04	57,04	6,17	5817
68	648	1,15	7,24	56,28	56,28	11,97	3505
69	649	1,69	2,63	57,80	57,80	12,34	1268
70	7ГІ - 650	1,40	6,49	58,31	58,31	10,55	3694
71	8ГІ - 651	1,72	5,04	57,80	57,80	14,19	2114
72	652	1,46	7,34	46,65	46,65	13,10	2692
73	653	2,08	7,18	57,55	57,55	14,29	2978
74	654	1,51	7,31	59,07	59,07	22,29	1995
75	655	1,80	4,74	59,58	59,58	21,33	1363
76	656	1,48	6,25	59,07	59,07	13,76	2763
77	657	1,51	7,20	57,80	57,80	14,25	3007
78	658	1,46	6,25	59,58	59,58	10,63	3607
79	659	1,83	7,30	55,52	55,52	12,94	3225
80	8ГІ - 660	1,37	6,64	56,54	56,54	15,14	2553
81	9ГІ - 661	1,46	3,94	56,54	56,54	11,90	1928
82	662	1,60	5,08	58,31	58,31	9,65	3161
83	663	1,03	4,09	58,06	58,06	5,22	4684
84	664	1,74	7,24	56,28	56,28	9,10	4611
85	665	1,43	6,16	55,27	55,27	19,07	1838
86	666	1,37	6,94	57,30	57,30	13,92	2942
87	667	1,40	2,90	57,30	57,30	12,43	1377
88	668	1,09	4,17	57,55	57,55	11,35	2177
89	669	1,12	7,01	54,76	54,76	11,44	3455
90	9ГІ - 670	1,03	2,03	58,56	58,56	12,01	1019
91	10ГІ - 671	1,54	6,93	57,30	57,30	3,34	12243
92	672	1,51	4,72	61,35	61,35	5,32	5605
93	673	0,83	4,94	62,87	62,87	14,10	2268
94	674	1,21	3,76	63,63	63,63	27,51	896
95	675	1,28	6,11	61,10	61,10	6,41	5997
96	676	1,54	2,77	62,37	62,37	10,24	1737
97	677	1,99	3,17	59,32	59,32	9,79	1978
98	678	1,80	7,32	59,07	59,07	11,83	3764
99	679	1,69	4,21	62,11	62,11	11,95	2253
100	10ГІ - 680	1,34	4,77	61,86	61,86	10,33	2941

Продовження таблиці ДкЗ.1

№	Інтервал проведення геологічних досліджень,м	Наватаження на долото $F_{д,тс}$	Обертний момент ротора $T_{об,р,кН·м}$	Частота обертання ротора $n_p, хв^{-1}$	Частота обертання долота $n_d, хв^{-1}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех,м/год}$	$W_{п, Н·м/см^3}$
101	11ГІ - 681	1,34	6,73	69,21	69,21	8,38	5724
102	682	1,09	6,50	70,23	70,23	9,01	5217
103	683	1,23	4,77	70,99	70,99	7,52	4637
104	684	1,43	6,24	70,73	70,73	7,45	6100
105	685	0,95	2,92	71,24	71,24	9,41	2276
106	686	1,72	7,08	68,20	68,20	10,54	4718
107	687	1,40	7,23	68,45	68,45	16,16	3154
108	688	1,34	6,99	69,46	69,46	11,34	4409
109	689	2,43	7,26	68,96	68,96	12,60	4092
110	11ГІ - 690	1,31	3,44	70,99	70,99	27,06	929
111	12ГІ - 691	1,37	2,66	52,23	52,23	9,14	1565
112	692	0,67	2,10	68,45	68,45	14,36	1031
113	693	1,34	7,28	66,68	66,68	14,36	3481
114	694	1,23	5,31	67,69	67,69	12,60	2938
115	695	1,23	6,32	67,44	67,44	14,30	3069
116	696	1,40	7,12	67,44	67,44	11,30	4376
117	697	1,57	7,28	63,89	63,89	13,62	3517
118	698	1,72	3,37	68,45	68,45	14,13	1681
119	699	1,34	3,80	64,39	64,39	20,08	1255
120	12ГІ - 700	1,74	7,29	66,68	66,68	13,20	909
121	13ГІ - 791	1,18	6,07	56,79	56,79	16,73	2122
122	792	1,63	3,50	59,07	59,07	13,75	1548
123	793	1,18	6,86	56,54	56,54	17,00	2349
124	794	0,92	3,41	60,85	60,85	10,30	2074
125	795	1,06	4,64	57,04	57,04	11,48	2374
126	796	1,29	3,75	54,25	54,25	11,03	1899
127	797	1,29	7,70	55,52	55,52	6,08	7240
128	798	1,78	8,81	55,52	55,52	9,22	5463
129	799	1,95	5,57	56,28	56,28	11,50	2807
130	13ГІ - 800	1,03	4,23	56,79	56,79	9,79	2527
131	14ГІ-871	1,45	3,63	58,31	58,31	10,48	2080
132	872	1,17	3,01	59,58	59,58	8,25	2238
133	873	1,31	2,44	59,32	59,32	4,96	3005
134	874	1,48	4,13	58,06	58,06	4,26	5796
135	875	1,28	3,65	59,07	59,07	4,41	5034
136	876	1,66	8,59	56,79	56,79	4,02	12496
137	877	1,71	4,99	58,82	58,82	4,26	7095
138	878	1,66	3,29	58,56	58,56	7,73	2567
139	879	1,48	4,56	58,82	58,82	9,05	3051
140	14ГІ - 880	1,57	4,88	56,03	56,03	10,25	2747
141	15ГІ - 921	1,24	6,31	60,08	60,08	8,81	4431
142	922	1,67	8,74	59,83	59,83	8,19	6575
143	923	1,93	9,62	58,31	58,31	10,04	5753
144	924	1,98	11,68	58,82	58,82	10,68	6624
145	925	1,42	3,56	58,56	58,56	11,90	1804
146	926	1,50	8,84	59,83	59,83	10,76	5062
147	927	1,33	6,45	58,31	58,31	10,41	3720
148	928	1,87	5,31	59,83	59,83	12,30	2660
149	929	1,81	3,93	60,59	60,59	13,06	1878
150	15ГІ - 930	1,39	4,59	60,85	60,85	10,46	2750

Продовження таблиці Дк3.1

№	Інтервал проведення геологічних досліджень,м	Навтаження на долото $F_{д,тс}$	Обертний момент ротора $T_{об,р,кН·м}$	Частота обертання ротора $n_{р,хв^{-1}}$	Частота обертання долота $n_{д,хв^{-1}}$	Механічна швидкість буріння $V_{мех,м/год}$	$W_{п},$ $Н·м/см^3$
151	16ГІ - 941	2,75	11,60	55,27	55,27	13,86	4763
152	942	1,75	6,96	61,61	61,61	16,80	2628
153	943	1,78	4,71	59,32	59,32	12,51	2300
154	944	1,18	4,40	59,32	59,32	8,46	3177
155	945	1,50	6,04	57,30	57,30	9,90	3600
156	946	1,18	2,90	57,80	57,80	9,54	1809
157	947	1,36	5,50	56,28	56,28	8,64	3689
158	948	1,53	3,72	56,54	56,54	12,41	1745
159	949	1,25	4,16	59,07	59,07	7,64	3312
160	16ГІ - 950	1,95	8,89	56,03	56,03	9,35	5486
161	17ГІ - 951	1,53	10,10	56,03	56,03	11,86	4914
162	952	1,36	3,73	58,31	58,31	16,02	1398
163	953	1,56	4,14	56,28	56,28	10,44	2298
164	954	1,82	4,30	55,01	55,01	14,71	1656
165	955	1,44	4,92	57,55	57,55	18,06	1614
166	956	1,47	4,45	57,80	57,80	8,90	2976
167	957	1,82	6,90	54,25	54,25	14,91	2585
168	958	1,56	9,32	58,82	58,82	10,63	5311
169	959	2,04	3,98	60,85	60,85	16,61	1501
170	17ГІ - 960	1,73	4,17	62,87	62,87	17,80	1517
171	18ГІ - 1031	1,98	5,06	65,66	65,66	8,65	3955
172	1032	1,91	3,28	67,18	67,18	6,17	3678
173	1033	2,20	7,39	63,13	63,13	8,64	5560
174	1034	2,00	4,79	65,92	65,92	12,06	2696
175	1035	2,00	8,05	61,61	61,61	9,31	5486
176	1036	1,94	6,29	64,65	64,65	9,24	4532
177	1037	2,00	3,99	63,13	63,13	8,11	3198
178	1038	2,22	5,96	62,37	62,37	7,26	5272
179	1039	2,05	4,86	63,38	63,38	7,78	4077
180	18ГІ - 1040	1,73	6,25	64,65	64,65	7,82	5321
181	19ГІ - 1231	2,62	7,47	59,83	59,83	7,94	5796
182	1232	2,69	9,95	59,58	59,58	9,80	6229
183	1233	2,66	10,91	57,80	57,80	10,13	6410
184	1234	1,85	8,24	69,72	69,72	7,86	7526
185	1235	1,58	11,17	66,68	66,68	6,69	11464
186	1236	2,91	19,85	59,58	59,58	12,52	9727
187	1237	2,03	5,95	66,42	66,42	15,21	2676
188	1238	1,51	4,62	66,68	66,68	11,29	2810
189	1239	3,54	13,82	63,13	63,13	9,80	9168
190	19ГІ - 1240	2,73	9,82	60,34	60,34	12,54	4866

1. Перший геологічний інтервал (1ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини
(Четвертий геологічний інтервал (4ГІ) за додатком 3)

Таблиця 1.1.1 (1.4.1) – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в першому (четвертому) геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 480-490 м, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%,											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH.i}$, м/ГОД	-	25,56	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
ΔT_B	год	0	0,0391	0,0748	0,0946	0,0646	0,0973	0,0689	0,0722	0,0613	0,0544
	хв	0	2,35	4,49	5,68	3,88	5,84	4,13	4,33	3,68	3,26
T_B , хв	0	2,35	6,84	12,52	16,4	22,24	26,37	30,7	34,38	37,64	42,02

Перший варіант мінімального об'єму вибірки пар дискретних значень T_B і H_B для визначення першої лінійної ділянки першого (четвертого) геологічного інтервалу 480-490 м починається з заглиблення 480 м. Результати перевірки трьох умов лінійності в першому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 480 м, наведено в табл.1.1.2 (1.4.2).

Таблиця 1.1.2 (1.4.2) – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 480-490 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
480-484	0,2291	0,2537	5	191	34,12	n'=3	13,82	3,18	n'=3	2,0	0,197
480-485	-	-	6	334	21,2	n'=4	18,28	2,78	n'=4	2,5	0,203
480-486	-	-	7	668	16,26	n'=5	25,84	2,57	n'=5	3,0	0,186
480-487	-	-	8	1200	13,74	n'=6	34,64	2,45	n'=6	3,5	0,173
480-488	-	-	9	1741	12,25	n'=7	41,73	2,36	n'=7	4,0	0,173
480-489	-	-	10	1802	11,26	n'=8	42,45	2,31	n'=8	4,5	0,201
480-490	0,2313	0,1005	11	2208	10,56	n'=9	47	2,26	n'=9	5,0	0,192

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі всього інтервалу заглиблення 480-490м, $H_B=10$ м.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 480-490 м виділено одну лінійну ділянку, яка охоплює весь інтервал.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = 0,2313 \cdot T_B + 0,1005 = 0,2313 \cdot 42,02 + 0,1005 = 9,82$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 1ГІ (4ГІ): за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEH.f} = H_{B.f} / T_B = 9,82 \text{ м} / 0,7007 \text{ год} = 14,01 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEH} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,7007 \text{ год} = 14,27 \text{ м} / \text{год}$.

2. Другий геологічний інтервал (2ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини
(П'ятий геологічний інтервал (5ГІ) за додатком 3)

Таблиця 1.2.1 (1.5.1) – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в другому (п'ятому) геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 490-500 м, літологічні характеристики породи: глина сіра - 100%,											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH.i}$, м/ГОД	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
ΔT_B	год	0	0,0910	0,0713	0,0656	0,0951	0,0873	0,0917	0,0634	0,0517	0,0591
	хв	0	5,46	4,28	3,93	5,71	5,24	5,50	3,80	3,10	3,55
T_B , хв	0	5,46	9,74	13,67	19,38	24,62	30,12	33,92	37,02	40,57	44,92

Результати перевірки трьох умов лінійності в другому (п'ятому) геологічному інтервалі, починаючи з глибини 490 м, наведено в табл.1.2.1 (1.5.2).

Таблиця 1.2.2 (1.5.2) – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 490-500 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
490-494	0,212	-0,0461	5	734	34,12	n'=3	27,09	3,18	n'=3	2,0	0,1
490-495	-	-	6	1340	21,2	n'=4	36,61	2,78	n'=4	2,5	0,102
490-496	-	-	7	1847	16,26	n'=5	42,98	2,57	n'=5	3,0	0,112
490-497	-	-	8	2969	13,74	n'=6	54,49	2,45	n'=6	3,5	0,11
490-498	-	-	9	1962	12,25	n'=7	44,29	2,36	n'=7	4,0	0,163
490-499	-	-	10	1560	11,26	n'=8	39,5	2,31	n'=8	4,5	0,216
490-500	0,2195	-0,1749	11	1314	10,56	n'=9	36,2	2,26	n'=9	5,0	0,249

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі всього інтервалу заглиблення 490-500 м.

За вищенаведеним матеріалом в геологічному інтервалі 490-500 м виділено одну лінійну ділянку, яка охоплює весь інтервал, $H_B=10$ м. За рівнянням регресії $H_{B,f} = 0,2195 \cdot T_B - 0,1749 = 0,2195 \cdot 44,92 - 0,1749 = 9,68$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки другого (п'ятого) геологічного інтервалу за рівнянням регресії $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 9,68 \text{ м} / 0,7487 \text{ год} = 12,93 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,7487 \text{ год} = 13,36 \text{ м} / \text{год}$.

3. Третій геологічний інтервал (ЗГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини (Чотирнадцятий геологічний інтервал (14ГІ) за додатком 3)

Таблиця 1.3.1 (1.14.1) – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в третьому (чотирнадцятому) геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 580-590 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
ΔT_B	год	0	0,0692	0,0514	0,033	0,0431	0,0766	0,0781	0,0406	0,0354	0,0401
	хв	0	4,15	3,08	3,20	2,59	4,60	4,69	2,44	2,12	2,40
T_B , хв	0	4,15	7,23	10,43	13,02	17,62	22,31	24,75	26,87	29,27	32,15

Результати перевірки трьох умов лінійності в третьому (чотирнадцятому) геологічному інтервалі, починаючи з глибини 580м, наведено в табл. 1.3.2 (1.14.2).

Таблиця 1.3.2 (1.14.2) Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 580-590 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
580-584	0,3073	-0,1406	5	437	34,12	n'=3	20,9	3,18	n'=3	2,0	0,178
580-585	-	-	6	893	21,2	n'=4	29,9	2,78	n'=4	2,5	0,125
580-586	-	-	7	623	16,26	n'=5	25	2,57	n'=5	3,0	0,193
580-587	-	-	8	1107	13,74	n'=6	33,3	2,45	n'=6	3,5	0,18
580-588	-	-	9	1157	12,25	n'=7	34	2,36	n'=7	4,0	0,213
580-589	-	-	10	1064	11,26	n'=8	33	2,31	n'=8	4,5	0,262
580-590	0,3040	0,1894	11	873	10,56	n'=9	29,5	2,26	n'=9	5,0	0,305

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 580-590 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = 0,3040 \cdot T_{Б} - 0,1894 = 0,3040 \cdot 32,15 - 0,1894 = 9,58 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 3ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,58 \text{ м} / 0,5358 \text{ год} = 17,88 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 0,5358 \text{ год} = 18,66 \text{ м} / \text{год}$.

4. Четвертий геологічний інтервал (4ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.4.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в четвертому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 610-620 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.ф}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0708	0,0643	0,0738	0,0714	0,0616	0,0810	0,0412	0,0530	0,0458
	хв	0	4,25	3,86	4,43	4,28	3,69	4,86	2,47	3,18	2,75
$T_{Б}$, хв	0	4,25	8,11	12,54	16,82	20,51	25,37	27,84	31,02	33,77	36,88

Результати перевірки трьох умов лінійності четвертому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 610м, наведено в табл.1.4.2.

Таблиця 1.4.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 610-620 м

Интервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1,n')}$		$T_{СП}$		$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
610-614	0,23839	0,01086	5	7086	34,12	n'=3	84,18	3,18	n'=3	2,0	0,03	
610-615	024177	-0,00756	6	7680	21,2	n'=4	87,67	2,78	n'=4	2,5	0,043	
610-616	0,23847	0,01566	7	8041	16,26	n'=5	89,67	2,57	n'=5	3,0	0,053	
610-617	0,24511	-0,0369	8	2765	13,74	n'=6	52,58	2,45	n'=6	3,5	0,114	
610-618	0,2519	-0,09921	9	1949	12,25	n'=7	44,15	2,36	n'=7	4,0	0,164	
610-619	0,25856	-0,17807	10	1429	11,26	n'=8	37,8	2,31	n'=8	4,5	0,226	
610-620	0,26630	-0,25596	11	1361	10,56	n'=9	36,9	2,26	n'=9	5,0	0,269	

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_{Б}$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 610-620 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_{Б} - 0,1894 = 0,26630 \cdot 36,88 - 0,25596 = 9,56 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 4ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,56 \text{ м} / 0,6147 \text{ год} = 15,55 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 0,6147 \text{ год} = 16,27 \text{ м} / \text{год}$.

5. П'ятий геологічний інтервал (5ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.5.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в п'ятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 620-630 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.ф}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0777	0,0846	0,0926	0,0751	0,0782	0,0968	0,0778	0,1027	0,0853
	хв	0	4,66	5,08	5,56	4,50	4,69	5,81	4,67	6,16	5,12
$T_{Б}$, хв	0	4,66	9,74	15,3	19,8	24,49	30,3	34,97	41,13	46,25	52,99

Результати перевірки трьох умов лінійності п'ятому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 620 м, наведено в табл.1.5.2.

Таблиця 1.5.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 620-630 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
620-624	0,19884	0,03147	5	2941	34,12	n'=3	54,2	3,18	n'=3	2,0	0,05
620-625	0,20164	0,01347	6	4670	21,2	n'=4	68,3	2,78	n'=4	2,5	0,05
620-626	0,19896	0,03585	7	6114	16,26	n'=5	78,2	2,57	n'=5	3,0	0,06
620-627	0,19907	0,03475	8	10995	13,74	n'=6	104,8	2,45	n'=6	3,5	0,06
620-628	0,19606	0,07031	9	7954	12,25	n'=7	89,2	2,36	n'=7	4,0	0,08
620-629	0,19456	0,0904	10	10139	11,26	n'=8	100,7	2,31	n'=8	4,5	0,08
620-630	0,19199	0,12983	11	8348	10,56	n'=9	91,4	2,26	n'=9	5,0	0,11

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 620-630 м.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = A \cdot T_B + B = 0,19199 \cdot 52,99 + 0,25596 = 10,43 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 5ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 10,43 \text{ м} / 0,8832 \text{ год} = 11,81 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,8832 \text{ год} = 11,32 \text{ м} / \text{год}$.

6. Шостий геологічний інтервал (6ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.6.1 Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в шостому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 630-640 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXi} , м/год	-	8,75	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3
ΔT_B	год	0	0,1143	0,0896	0,0629	0,0630	0,0554	0,0566	0,0737	0,0607	0,0965
	хв	0	6,86	5,38	3,78	3,78	3,32	3,40	4,42	3,64	5,79
T_B , хв	0	6,86	12,24	16,02	19,8	23,12	26,52	30,94	34,58	40,37	47,6
		0	5,38	9,16	12,94	16,26	19,66	24,08	27,72	33,51	40,74

Результати перевірки трьох умов лінійності шостому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 630м, наведено в табл.1.6.2.

Таблиця 1.6.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 630-640 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
630-634	0,20122	-0,2105	5	156,3	34,12	n'=3	12,5	3,18	n'=3	2,0	0,217
631-635	0,24734	-0,16374	5	343,5	34,12	n'=3	18,5	2,78	n'=3	2,0	0,147
631-636	0,25781	-0,22427	6	520,7	21,2	n'=4	22,8	2,57	n'=4	2,5	0,163
631-637	0,25826	-0,22753	7	1043	16,26	n'=5	32,3	2,57	n'=5	3,0	0,149
631-638	0,25973	-0,24015	8	1843	13,74	n'=6	43	2,45	n'=6	3,5	0,140
631-639	0,25140	-0,15401	9	1598	12,25	n'=7	40	2,36	n'=7	4,0	0,181
631-640	0,2353	0,0422	10	690	11,26	n'=8	26,3	2,31	n'=8	4,5	0,324

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 631-640 м.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = A \cdot T_B + B = 0,2353 \cdot 40,74 + 0,0422 = 9,63 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 6ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 9,63 \text{ м} / 0,679 \text{ год} = 14,18 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 9 \text{ м} / 0,679 \text{ год} = 13,25 \text{ м} / \text{год}$.

Інтервал 630-631 м не входить у лінійну ділянку 6ГІ, але він може входити у лінійну ділянку 5ГІ., так як для цих інтервалів глибина заглиблення зростає безперервно. За цим збільшуємо об'єм лінійної ділянки 5ГІ на одне значення і одержимо інтервал буріння 620-631 м.

Таблиця 1.5.1* – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в п'ятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 620-631 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9
ΔT_B	год	0	0,0777	0,0846	0,0926	0,0751	0,0782	0,0968	0,0778	0,1027	0,0853
	хв	0	4,66	5,08	5,56	4,50	4,69	5,81	4,67	6,16	5,12
T_B , хв	0	4,66	9,74	15,3	19,8	24,49	30,3	34,97	41,13	46,25	52,99
Глибина, м	630	631	H_B , м	11	$V_{MEX.i}$, м/год	8,75	ΔT_B , хв	6,86	T_B , хв	59,85	

Таблиця 1.5.2* – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 620-631 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$	$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$	$\bar{H}_B$	σ_0
620-631	0,18649	0,22406	12	3645	n'=10	60,4	n'=10	5,5	0,189

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 620-631 м.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = A \cdot T_B + B = 0,18649 \cdot 59,85 + 0,22406 = 11,38$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 5ГІ*: за рівнянням регресії $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 11,38 \text{ м} / 0,9975 \text{ год} = 11,41 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини- $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 11 \text{ м} / 0,9975 \text{ год} = 11,03 \text{ м} / \text{год}$.

7. Сьомий геологічний інтервал (7ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.7.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в сьомому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 640-650 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64	6,17	11,97	12,34	10,55
ΔT_B	год	0	0,1148	0,0758	0,0983	0,0525	0,1233	0,1506	0,1621	0,0835	0,0810
	хв	0	6,89	4,54	5,9	3,15	7,4	9,04	9,72	5,01	4,86
T_B , хв	0	6,89	11,43	17,33	20,48	27,88	36,92	46,64	51,65	56,51	62,2
								0	5,01	9,87	15,56

Результати перевірки трьох умов лінійності сьомому геологічному інтервалі, починаючи з глибини 640м, наведено в табл.1.7.2.

Таблиця 1.7.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 640-650 м

Интервал загиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$			$\bar{H}_B$	σ_0
640-644	0,19162	-0,15496	5	222	34,12	n'=3	14,9	3,18	n'=3	2,0	0,182	
640-645	0,18648	-0,1111	6	461	21,2	n'=4	21,5	2,78	n'=4	2,5	0,173	
640-646	0,17046	0,0551	7	328	16,26	n'=5	18,1	2,57	n'=4	3,0	0,265	
640-647	0,1553	0,2471	8	270	13,74	n'=6	16,5	2,45	n'=6	3,5	0,361	

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}, T_{СП} > T_{KP(0,05;n')} \text{ і } \sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 640-646 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_B + B = 0,1553 \cdot 36,92 + 0,2471 = 5,98 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 7ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 5,98 \text{ м} / 0,6153 \text{ год} = 9,72 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 6 \text{ м} / 0,6153 \text{ год} = 9,75 \text{ м} / \text{год}$.

В діапазоні заглиблення свердловини 647-650 м можлива друга лінійна ділянка 7ГІ, яка враховуючи безперервність зростання величини заглиблення для геологічних інтервалів 7ГІ і 8ГІ, може належати до лінійної ділянки інтервалу 8ГІ. За цим починаємо цей інтервал з глибини 647 м а не з глибини 650 м.

8. Восьмий геологічний інтервал (8ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.8.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в восьмому геологічному інтервалі

Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{МЕХ.і}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76
ΔT_B	год	0	0,0835	0,0810	0,0948	0,0705	0,0763	0,070	0,0449	0,0469
	хв	0	5,01	4,86	5,69	4,23	4,58	4,2	2,69	2,81
T_B , хв	0	5,01	9,87	15,56	19,79	24,37	28,57	31,26	34,07	38,43
Глибина, м	657	658	659	660						
H_B , м	10	11	12	13						
$V_{МЕХ.і}$, м/год	14,25	10,63	12,94	15,14						
ΔT_B	год	0,0702	0,0941	0,0773	0,066					
	хв	4,21	5,64	4,64	3,96					
T_B , хв	42,64	48,28	52,92	56,88						

Таблиця 1.8.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 647-660 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
647-651	0,1992	-0,0011	5	2080	34,12	n'=3	45,6	3,18	n'=3	2,0	0,06
647-652	0,2033	-0,0282	6	2786	21,2	n'=4	52,8	2,78	n'=4	2,5	0,07
647-653	0,2080	-0,066	7	2690	16,26	n'=5	51,9	2,57	n'=5	3,0	0,09
647-654	0,2172	-0,1502	8	984	13,74	n'=6	31,4	2,45	n'=6	3,5	0,191
647-655	0,2272	-0,2542	9	651	12,25	n'=7	25,5	2,36	n'=7	4,0	0,285
647-656	0,2334	-0,3298	10	791	11,26	n'=8	28,1	2,31	n'=8	4,5	0,303
647-657	0,2373	-0,3837	11	1059	10,56	n'=9	32,5	2,26	n'=9	5,0	0,304
647-658	0,2366	-0,3731	12	1527	10,04	n'=10	39	2,23	n'=10	5,5	0,291
647-659	0,2354	-0,3526	13	2104	9,86	n'=11	45,9	2,2	n'=11	6,0	0,281
647-660	0,23517	-0,34773	14	2859	9,33	n'=12	53,6	2,18	n'=12	6,5	0,27

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}, T_{СП} > T_{KP(0,05;n')} \text{ і } \sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 647-660 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_B + B = 0,23517 \cdot 56,88 - 0,34773 = 13,03 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 8ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 13,03 \text{ м} / 0,948 \text{ год} = 13,74 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 13 \text{ м} / 0,948 \text{ год} = 13,71 \text{ м} / \text{год}$.

9. Дев'ятий геологічний інтервал (9ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.9.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в дев'ятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 660-670 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEH_i} , м/год	-	11,9	9,65	5,22	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01
ΔT_B	год	0	0,0840	0,1036	0,1915	0,1099	0,0524	0,0718	0,0804	0,0881	0,0874
	хв	0	5,04	6,22	11,49	6,59	3,15	4,31	4,83	5,29	5,24
T_B , хв	0	5,04	11,26	22,75	29,34	0,22>0,2					
		0	6,22	17,71	24,3	27,45	0,29>0,2				
			0	11,49	18,08	21,23	25,54	0,4>0,2			
				0	6,59	9,74	14,05	18,88	24,17	29,41	34,41

Таблиця 1.9.2 Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 647-660 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
660-664	0,12835	0,2444	5	150	34,12	n'=3	12,3	3,18	n'=3	2,0	<u>0,22</u>
661-665	0,1323	-0,0054	5	87,7	34,12	n'=3	9,4	3,18	n'=3	2,0	<u>0,29</u>
662-666										2,0	<u>0,4</u>
663-667	0,21862	-0,1538	5	260,1	34,12	n'=3	16,1	3,18	n'=3	2,0	0,169
663-668	0,2145	-0,1252	6	571	21,2	n'=4	23,9	2,78	n'=4	2,5	0,156
663-669	0,2102	-0,0885	7	1002	16,26	n'=5	31,6	2,57	n'=5	3,0	0,152
663-670	0,20764	-0,06234	8	1663	13,74	n'=6	40,8	2,45	n'=6	3,5	0,147

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 663-670 м.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = A \cdot T_B + B = 0,20764 \cdot 34,41 - 0,06234 = 7,08$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 9ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEH.f} = H_{B.f} / T_B = 7,08 \text{ м} / 0,5735 \text{ год} = 12,34 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEH} = H_B / T_B = 7 \text{ м} / 0,5735 \text{ год} = 12,20 \text{ м} / \text{год}$.

10. Десятий геологічний інтервал (10ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.10.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в чотирнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 670-680 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEH_i} , м/год	-	3,34	5,32	14,1	27,51	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33
ΔT_B	год	0	0,2994	0,1880	0,0709	0,0364	0,156	0,0976	0,1021	0,0845	0,0837
	хв	0	17,96	11,28	4,26	2,18	9,36	5,86	6,13	5,07	5,02
T_B , хв	0	17,96	29,24	33,5	35,68						
		0	11,28	15,54	17,72	27,08					
			0	4,26	6,44	15,8	21,66				
				0	2,18	11,54	17,4	23,53			
					0	9,36	15,22	21,35	26,42	31,44	37,25

Таблиця 1.9.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 670-680 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$			$\bar{H}_B$	σ_0
670-674	0,1006	-0,3411	5	20,8	34,12	n'=3	4,6	3,18	n'=3	2,0	0,56	
671-675	0,1553	-0,2248	5	48,0	34,12	n'=3	6,93	3,18	n'=3	2,0	0,38	
672-676	0,1744	0,320	5	66,5	34,12	n'=3	8,15	3,18	n'=3	2,0	0,33	
673-677	0,1569	0,2854	5	127	34,12	n'=3	11,3	3,18	n'=3	2,0	0,24	
674-678	0,1521	-0,2011	5	214	34,12	n'=3	14,6	3,18	n'=3	2,0	0,186	
674-679	0,161	-0,285	6	298	21,2	n'=4	17,3	2,78	n'=4	2,5	0,215	
674-680	0,16589	-0,34237	7	497	16,26	n'=5	22,3	2,57	n'=5	3,0	0,216	

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 674-680 м.

За рівнянням регресії $H_{B,f} = A \cdot T_B + B = 0,16589 \cdot 37,25 - 0,34237 = 5,84 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 9ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 5,84 \text{ м} / 0,6208 \text{ год} = 9,41 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 6 \text{ м} / 0,6208 \text{ год} = 9,66 \text{ м} / \text{год}$.

11. Одинадцятий геологічний інтервал (11ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.11.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в одинадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 680-690 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXi} , м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	27,06
ΔT_B	год	0	0,1193	0,1110	0,1330	0,1342	0,1062	0,0949	0,0619	0,0882	0,0794
	хв	0	7,16	6,66	8,0	8,05	6,37	5,69	3,71	5,29	4,76
T_B , хв	0	7,16	13,82	21,82	29,87	36,24	41,93	45,64	50,93	55,69	57,91

Результати перевірки трьох умов лінійності одинадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 680 м, наведено в табл. 1.11.2.

Таблиця 1.11.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 680-690 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
680-684	0,1342	0,0496	5	1918	34,12	n'=3	43,8	3,18	n'=3	2,0	0,06
680-685	0,1359	0,0193	6	3620	21,2	n'=4	60,2	2,78	n'=4	2,5	0,06
680-686	0,1397	-0,0103	7	231	16,26	n'=5	48,1	2,57	n'=5	3,0	0,1
680-687	0,1474	-0,1086	8	787	13,74	n'=6	28	2,45	n'=6	3,5	0,21
680-688	0,1524	-0,1897	9	703	12,25	n'=7	26,5	2,36	n'=7	4,0	0,271
680-689	0,1578	-0,2845	10	695	11,26	n'=8	26,4	2,31	n'=8	4,5	0,323
680-690	0,16508	-0,41792	11	567	10,56	n'=9	22,5	2,26	n'=9	5,0	0,438

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 680-690 м.

За рівнянням регресії $H_{B,f} = A \cdot T_B + B = 0,16508 \cdot 57,91 - 0,41792 = 9,14 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 11ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 9,14 \text{ м} / 0,9652 \text{ год} = 9,47 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,9652 \text{ год} = 10,36 \text{ м} / \text{год}$.

12. Дванадцятий геологічний інтервал (12ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.12.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в дванадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 690-700 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXI} , м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
ΔT_B	год	0	0,1094	0,0696	0,0696	0,0794	0,0699	0,0885	0,0734	0,0708	0,0498
	хв	0	6,56	4,18	4,18	4,76	4,20	5,31	4,40	4,25	2,99
T_B , хв	0	6,56	10,74	14,92	19,68	23,88	29,19	33,59	37,84	40,83	45,37

Результати перевірки трьох умов лінійності дванадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 690 м, наведено в табл.1.12.2.

Таблиця 1.12.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 690-700 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
690-694	0,2078	-0,1577	5	369	34,12	n'=3	19,2	3,18	n'=3	2,0	0,141
680-685	0,2136	-0,1976	6	701	21,2	n'=4	26,5	2,78	n'=4	2,5	0,141
680-686	0,2127	-0,190	7	1394	16,26	n'=5	37,3	2,57	n'=5	3,0	0,129
680-687	0,2135	-0,1981	8	2484	13,74	n'=6	49,8	2,45	n'=6	3,5	0,12
680-688	0,2152	-0,2177	9	3808	12,25	n'=7	61,7	2,36	n'=7	4,0	0,117
680-689	0,222	0,280	10	2769	11,26	n'=8	52,6	2,31	n'=8	4,5	0,162
680-690	0,22294	-0,32201	11	3299	10,56	n'=9	57,4	2,26	n'=9	5,0	0,173

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 680-690 м.

За рівнянням регресії $H_{B.f} = A \cdot T_B - 0,1894 = 0,22294 \cdot 45,37 - 0,32201 = 9,79$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 12ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX.f} = H_{B.f} / T_B = 9,79 \text{ м} / 0,7562 \text{ год} = 12,95 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 0,7562 \text{ год} = 13,22 \text{ м} / \text{год}$.

13. Тринадцятий геологічний інтервал (13ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.13.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в тринадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 790-800 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXI} , м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03	6,08	9,22	11,50	9,79
ΔT_B	год	0	0,0598	0,0727	0,0588	0,0971	0,0871	0,0907	0,1645	0,1084	0,087
	хв	0	3,59	4,36	3,53	5,82	5,23	5,44	9,87	6,51	5,22
T_B , хв	0	3,59	7,95	11,48	17,3	22,53	27,97				
							0	9,87	16,38	21,6	27,73

Результати перевірки трьох умов лінійності тринадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 790 м, наведено в табл.1.13.2.

Таблиця 1.13.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 790-800 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
790-794	0,2334	0,1177	5	363	34,12	n'=3	19,1	3,18	n'=3	2,0	0,143
790-795	0,2207	0,1884	6	488	21,2	n'=4	22,1	2,78	n'=4	2,5	0,169
790-796	0,2119	0,2503	7	673	16,26	n'=5	26	2,57	n'=5	3,0	0,186
790-797	0,1881	0,4747	8	257	13,74	n'=6	16	2,45	n'=6	3,5	0,37
796-800	0,1465	-0,2139	5	185	34,12	n'=3	13,6	3,18	n'=3	2,0	0,199

За умовами лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ інтервал заглиблення 790-800 м поділяється на дві лінійні ділянки: перша ділянка (13ГІ.1): 790-796 м; друга (13ГІ.1) – 796-800 м.

Перша ділянка за рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_B + B = 0,2119 \cdot 27,97 + 0,2503 = 6,18$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 13ГІ.1: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 6,18 \text{ м} / 0,4662 \text{ год} = 13,26 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 6 \text{ м} / 0,4662 \text{ год} = 12,87 \text{ м} / \text{год}$.

Друга ділянка за рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_B + B = 0,1465 \cdot 27,73 - 0,2139 = 3,85$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 13ГІ.2: за рівнянням регресії $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 3,85 \text{ м} / 0,4622 \text{ год} = 8,33 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 4 \text{ м} / 0,4622 \text{ год} = 8,65 \text{ м} / \text{год}$.

14. Чотирнадцятий геологічний інтервал (14ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.14.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в чотирнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 870-880 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ}$, м/год	-	10,48	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25
ΔT_B	год	0	0,0954	0,1212	0,2016	0,2347	0,2268	0,2488	0,2347	0,1293	0,1105
	хв	0	5,72	7,27	12,10	14,08	13,60	14,92	14,08	7,76	6,63
T_B , хв	0	5,72	12,99	25,09	39,17						
		0	7,27	19,37	33,45	47,05	61,97	76,05	83,81	90,44	96,29

Результати перевірки трьох умов лінійності чотирнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 870 м, наведено в табл. 1.14.2.

Таблиця 1.14.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 870-880 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1,n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
870-874	0,0988	0,3596	5	84,9	34,12	n'=3	9,2	3,18	n'=3	2,0	0,29
871-875	0,0814	0,2392	5	234	34,12	n'=3	15,3	3,18	n'=3	2,0	0,178
871-876	0,0780	0,2870	6	429	21,2	n'=4	20,7	2,78	n'=4	2,5	0,18
871-877	0,0762	0,3220	7	744	16,26	n'=5	27,3	2,57	n'=5	3,0	0,176
871-878	0,0780	0,2834	8	1043	13,74	n'=6	32,3	2,45	n'=6	3,5	0,185
871-879	0,0812	0,2068	9	773	12,25	n'=7	27,8	2,36	n'=7	4,0	0,259
871-880	0,08507	0,1042	10	531	11,26	n'=8	23	2,31	n'=8	4,5	0,369

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 871-880 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_{Б} + B = 0,08507 \cdot 96,29 + 0,1042 = 8,3 м$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 14ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 8,3 м / 1,6048 год = 5,17 м / год$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 9 м / 1,6048 год = 5,61 м / год$.

15. Пятнадцятий геологічний інтервал (15ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.15.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в п'ятнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 920-930 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.ф}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,1135	0,1221	0,0996	0,0936	0,0840	0,0929	0,0961	0,0813	0,0956
	хв	0	6,81	7,33	5,98	5,62	5,04	5,58	5,76	4,88	5,74
$T_{Б}$, хв	0	6,81	14,14	20,12	25,74	30,78	36,36	42,12	47	51,59	57,33

Результати перевірки трьох умов лінійності п'ятнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 920 м, наведено в табл.1.15.2.

Таблиця 1.15.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 920-930 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{КР(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{КР(0,05;n')}$		$\bar{H}_{Б}$	σ_0
920-924	0,1539	-0,0566	5	1060	34,12	n'=3	32,5	3,18	n'=3	2,0	0,08
920-925	0,1608	-0,1152	6	857	21,2	n'=4	29,3	2,78	n'=4	2,5	0,127
920-926	0,1654	-0,1728	7	1004	16,26	n'=5	31,7	2,57	n'=5	3,0	0,152
920-927	0,168	-0,1984	8	1716	13,74	n'=6	41,4	2,45	n'=6	3,5	0,144
920-928	0,1713	-0,2462	9	2044	12,25	n'=7	45,2	2,36	n'=7	4,0	0,16
920-929	0,175	-0,3061	10	2065	11,26	n'=8	45,4	2,31	n'=8	4,5	0,188
920-930	0,17712	-0,3455	11	2660	10,56	n'=9	51,6	2,26	n'=9	5,0	0,192

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{КР(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{КР(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_{Б}$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 920-930 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_{Б} + B = 0,17712 \cdot 57,33 - 0,3455 = 9,81 м$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 15ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,81 м / 0,9555 год = 10,27 м / год$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 м / 0,9555 год = 10,46 м / год$.

16. Шістнадцятий геологічний інтервал (16ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.16.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в шістнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 940-950 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХ.ф}$, м/год	-	13,86	16,80	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,0722	0,0595	0,0799	0,1182	0,1010	0,1048	0,1118	0,0806	0,1309
	хв	0	4,33	3,57	4,80	7,09	6,06	6,29	6,71	4,83	7,85
$T_{Б}$, хв	0	4,33	7,9	12,7	19,79						
		0	3,57	8,37	15,46	21,52	27,81	34,52	39,35	47,2	53,62

Результати перевірки трьох умов лінійності шістнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 940 м, наведено в табл.1.16.2.

Таблиця 1.16.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 940-950 м

Интервал заглубления	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
940-944	0,2048	0,1682	5	164	34,12	n'=3	12,8	3,18	n'=3	2,0	<u>0,212</u>
941-945	0,1793	0,2453	5	198	34,12	n'=3	14,1	3,18	n'=3	2,0	0,193
941-946	0,1733	0,284	6	401	21,2	n'=4	20	2,78	n'=4	2,5	0,186
941-947	0,1682	0,3262	7	667	16,26	n'=5	25,8	2,57	n'=5	3,0	0,186
941-948	0,169	0,3187	8	1193	13,74	n'=6	34,5	2,45	n'=6	3,5	0,173
941-949	0,1656	0,361	9	1595	12,25	n'=7	39,9	2,36	n'=7	4,0	0,181
941-950	0,16336	0,3927	10	2203	11,26	n'=8	46,9	2,31	n'=8	4,5	0,182

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 941-950 м.

За рівнянням регресії $H_{B,f} = A \cdot T_B + B = 0,16336 \cdot 53,62 + 0,3927 = 9,15 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 16ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{MEX,f} = H_{B,f} / T_B = 9,15 \text{ м} / 0,8938 \text{ год} = 10,24 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{MEX} = H_B / T_B = 9 \text{ м} / 0,8938 \text{ год} = 10,07 \text{ м} / \text{год}$.

17. Сімнадцятий геологічний інтервал (17ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.17.1 – Дискретні значення проходки на долото H_B , м і часу буріння T_B , хв при поглибленні свердловини в тринадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 950-960 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEX} , м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
ΔT_B	год	0	0,0843	0,0624	0,0958	0,0680	0,0554	0,1124	0,0671	0,0941	0,0562
	хв	0	5,06	3,74	5,75	4,08	3,32	6,74	4,02	5,64	3,37
T_B , хв	0	5,06	8,8	14,55	18,63	21,95	28,69	32,71	38,35	41,96	45,33

Результати перевірки трьох умов лінійності шістнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 940 м, наведено в табл.1.17.2.

Таблиця 1.17.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 950-960 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
950-954	0,2132	-0,0058	5	918	34,12	n'=3	30,3	3,18	n'=3	2,0	0,09
950-955	0,2229	-0,0633	6	791	21,2	n'=4	28,1	2,78	n'=4	2,5	0,133
950-956	0,2148	0,0024	7	974	16,26	n'=5	31,2	2,57	n'=5	3,0	0,154
950-957	0,2143	0,0073	8	1750	13,74	n'=6	41,8	2,45	n'=6	3,5	0,143
950-958	0,211	0,0439	9	2405	12,25	n'=7	49	2,36	n'=7	4,0	0,148
950-959	0,2122	0,0295	10	3637	11,26	n'=8	60,3	2,31	n'=8	4,5	0,142
950-960	0,21546	-0,01502	11	3677	10,56	n'=9	60,6	2,26	n'=9	5,0	0,164

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 950-960 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_{Б} + B = 0,21546 \cdot 45,33 - 0,01502 = 9,75 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 16ГІ: за рівнянням регресії $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 9,75 \text{ м} / 0,7555 \text{ год} = 12,90 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 0,7555 \text{ год} = 13,24 \text{ м} / \text{год}$.

18. Вісімнадцятий геологічний інтервал (18ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.18.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в вісімнадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 1030-1040 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХi}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,1156	0,1621	0,1157	0,0829	0,1074	0,1082	0,1233	0,1377	0,1285
	хв	0	6,94	9,72	6,94	4,98	6,44	6,49	7,40	8,26	7,71
$T_{Б}$, хв	0	6,94	16,66	23,6	28,58	35,02	41,51	48,91	57,17	64,88	72,55

Результати перевірки трьох умов лінійності вісімнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 940 м, наведено в табл. 1.18.2.

Таблиця 1.18.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень $T_{Б}$ і $H_{Б}$ в інтервалі заглиблення 1030-1040 м

Интервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
1030-1034	0,134	-0,0306	5	271	34,12	n'=3	16,4	3,18	n'=3	2,0	0,165
1030-1035	0,1404	-0,0918	6	409	21,2	n'=4	20,2	2,78	n'=4	2,5	0,184
1030-1036	0,1443	-0,1394	7	664	16,26	n'=5	25,8	2,57	n'=5	3,0	0,187
1030-1037	0,1453	-0,154	8	1175	13,74	n'=6	34,3	2,45	n'=6	3,5	0,174
1030-1038	0,1438	-0,1438	9	1841	12,25	n'=7	42,9	2,36	n'=7	4,0	0,168
1030-1039	0,1422	-0,0962	10	2601	11,26	n'=8	51	2,31	n'=8	4,5	0,168
1030-1040	0,14073	-0,06413	11	3465	10,56	n'=9	58,9	2,26	n'=9	5,0	0,169

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_{Б}$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 1030-1040 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_{Б} + B = 0,14073 \cdot 72,55 - 0,06413 = 10,14 \text{ м}$.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 16ГІ: за рівнянням регресії $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_{Б} = 10,14 \text{ м} / 1,2092 \text{ год} = 8,38 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини $\bar{V}_{МЕХ} = H_{Б} / T_{Б} = 10 \text{ м} / 1,2092 \text{ год} = 8,27 \text{ м} / \text{год}$.

19. Дев'ятнадцятий геологічний інтервал (19ГІ) в аналізованому діапазоні заглиблення свердловини

Таблиця 1.19.1 – Дискретні значення проходки на долото $H_{Б}$, м і часу буріння $T_{Б}$, хв при поглибленні свердловини в тринадцятому геологічному інтервалі

Геологічний інтервал 1230-1240 м, літологічні характеристики породи: Глина сіра – 100%											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
$H_{Б}$, м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{МЕХi}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
$\Delta T_{Б}$	год	0	0,1259	0,1020	0,0987	0,1272	0,1495	0,0799	0,0657	0,0886	0,1020
	хв	0	7,56	6,12	5,92	7,63	8,97	4,79	3,94	5,31	6,12
$T_{Б}$, хв	0	7,56	13,68	19,6	27,23	36,2	40,99	44,93	50,24	56,36	61,14

Результати перевірки трьох умов лінійності вісімнадцятого геологічного інтервалу, починаючи з глибини 940 м, наведено в табл.1.19.2.

Таблиця 1.19.2 – Перевірка умов лінійності для вибірок значень T_B і H_B в інтервалі заглиблення 1230-1240 м

Інтервал заглиблення	A	B	n	$F_{СП}$	$F_{KP(0,01;1;n')}$		$T_{СП}$	$T_{KP(0,05;n')}$		$\bar{H}_B$	σ_0
1230-1234	0,150	-0,0426	5	1328	34,12	n'=3	36,5	3,18	n'=3	2,0	0,075
1230-1235	0,1416	0,039	6	802	21,2	n'=4	28,3	2,78	n'=4	2,5	0,132
1230-1236	0,144	0,0126	7	1390	16,26	n'=5	37,2	2,57	n'=5	3,0	0,129
1230-1237	0,1499	00,0631	8	923	13,74	n'=6	30,4	2,45	n'=6	3,5	0,197
1230-1238	0,1549	-0,139	9	905	12,25	n'=7	30,1	2,36	n'=7	4,0	0,24
1230-1239	0,1582	-0,1968	10	1142	11,26	n'=8	33,8	2,31	n'=8	4,5	0,25
1230-1240	0,16183	-0,26567	11	1281	10,56	n'=9	35,8	2,26	n'=9	5,0	0,28

Всі три умови лінійності $F_{СП} > F_{KP(0,01;1;n')}$, $T_{СП} > T_{KP(0,05;n')}$ і $\sigma_0 < 0,1\bar{H}_B$ виконуються на протязі інтервалу заглиблення 1230-1240 м.

За рівнянням регресії $H_{Б.ф} = A \cdot T_B + B = 0,16183 \cdot 61,14 - 0,26567 = 9,63$ м.

Середнє значення механічної швидкості буріння для лінійної ділянки 16ГІ: за рівнянням регресії – $\bar{V}_{МЕХ.ф} = H_{Б.ф} / T_B = 9,63 \text{ м} / 1,019 \text{ год} = 9,45 \text{ м} / \text{год}$; за величиною заглиблення свердловини – $\bar{V}_{МЕХ} = H_B / T_B = 10 \text{ м} / 1,019 \text{ год} = 9,81 \text{ м} / \text{год}$.

Підсумкова узагальнена таблиця за всіма інтервалами заглиблення свердловини для однакових літологічних характеристик породи – рівняння регресії лінійних ділянок та середні значення механічної швидкості для кожного інтервалу

Глибина свердловини та порядковий номер геологічного інтервалу (ГІ)	Позначення лінійної ділянки,	Інтервал лінійної ділянки, м	Рівняння лінійної регресії	$\bar{V}_{мех}, \text{ м} / \text{год}$	
				За рівнянням	За заглибленням
480-490 м 1ГІ	1ГІ	480-490	$H_{Б.ф} = 0,2313 \cdot T_B + 0,1005$	14,01	14,27
490-500 м 2ГІ	2ГІ	490-500	$H_{Б.ф} = 0,2195 \cdot T_B + 0,1749$	12,93	13,36
580-590 м 3ГІ	3ГІ	580-590	$H_{Б.ф} = 0,3040 \cdot T_B - 0,1814$	17,88	18,66
610-620 м 4ГІ	4ГІ	610-520	$H_{Б.ф} = 0,2663 \cdot T_B - 0,25596$	15,55	16,27
620-631 м 5ГІ	5ГІ*	620-631	$H_{Б.ф} = 0,18649 \cdot T_B + 0,22406$	11,41	11,03
630-640 м 6ГІ	6ГІ	631-640	$H_{Б.ф} = 0,2353 \cdot T_B + 0,0422$	14,18	13,25
640-650 м 7ГІ	7ГІ	640-647	$H_{Б.ф} = 0,1553 \cdot T_B + 0,2467$	9,72	9,75
650-660 м 8ГІ	8ГІ	647-660	$H_{Б.ф} = 0,23517 \cdot T_B - 0,34773$	13,74	13,71
660-670 м 9ГІ	9ГІ	663-670	$H_{Б.ф} = 0,20764 \cdot T_B - 0,06234$	12,34	12,2
670-680 м 10ГІ	10ГІ	674-680	$H_{Б.ф} = 0,16589 \cdot T_B - 0,34237$	9,41	9,66
680-690 м 11ГІ	11ГІ	680-690	$H_{Б.ф} = 0,16508 \cdot T_B - 0,41792$	9,47	10,36

Підсумкова узагальнена таблиця за всіма інтервалами заглиблення свердловини для однакових літологічних характеристик породи – рівняння регресії лінійних ділянок та середні значення механічної швидкості для кожного інтервалу

Глибина свердловини та порядковий номер геологічного інтервалу (ГІ)	Позначення лінійної ділянки,	Інтервал лінійної ділянки, м	Рівняння лінійної регресії	$\bar{V}_{\text{мех}}, \text{м / год}$	
				За рівнянням	За заглибленням
690-700 м 12ГІ	12ГІ	690-700	$H_{Б.ф} = 0,22294 \cdot T_{Б} - 0,32201$	12,95	13,22
790-800 м 13ГІ	13ГІ.1	790-796	$H_{Б.ф} = 0,2119 \cdot T_{Б} + 0,2503$	13,26	12,87
	13ГІ.2	796-800	$H_{Б.ф} = 0,1465 \cdot T_{Б} - 0,2139$	8,33	8,65
870-880 м 14ГІ	14ГІ	871-880	$H_{Б.ф} = 0,08507 \cdot T_{Б} + 0,1042$	5,17	5,61
920-930 м 15ГІ	15ГІ	920-930	$H_{Б.ф} = 0,17712 \cdot T_{Б} - 0,3455$	10,27	10,46
940-950 м 16ГІ	16ГІ	941-950	$H_{Б.ф} = 0,16336 \cdot T_{Б} + 0,3927$	10,24	10,07
940-950 м 17ГІ	17ГІ	950-960	$H_{Б.ф} = 0,21546 \cdot T_{Б} - 0,01502$	12,9	13,24
1030-1040 м 18ГІ	18ГІ	1030-1040	$H_{Б.ф} = 0,14073 \cdot T_{Б} - 0,06413$	8,38	8,27
1230-1240 м 19ГІ	19ГІ	1030-1040	$H_{Б.ф} = 0,16183 \cdot T_{Б} - 0,26567$	9,45	9,81

Другий етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом". Визначення статистичних характеристик вибірок дискретних значень технологічних параметрів буріння: механічної швидкості, осьового навантаження на долото, частоти обертання долота і обертового моменту ротора, для виділених лінійних ділянок

На першому етапі "Виділення однорідних за буримістю ділянок поглиблення свердловини" в інтервалі заглиблення свердловини 450-1240 м було виділено двадцять однорідних лінійних ділянок, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 2.1 – Статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{\text{мех.і}}$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-1240 м заглиблення свердловини, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%

Перший геологічний інтервал – 480-490 м											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{MEXi} , м/год	-	25,56	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
Статистичні характеристики	$\bar{V}_{MEX}$, $m / год$ За загл.		$\bar{V}_{MEX}$, $m / год$		D_V , $(m / год)^2$		σ_V , $m / год$		R_V , %		
	14,27		15,20		19,1456		4,3756		28,8		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=1,07 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											

Продовження табл. 2.1

Другий геологічний інтервал – 490-500 м											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, $м / год$ За загл.		$\bar{V}_{MEX}$, $м / год$		D_V , $(м / год)^2$		σ_V , $м / год$		R_V , %
			13,36		13,90		8,7721		2,9618		21,3
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=0,72 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Третій геологічний інтервал – 580-590 м											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
Статистичні характеристики			18,66		20,03		28,5811		5,3461		26,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,6 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Четвертий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
Статистичні характеристики			16,27		17,01		15,4536		3,3911		19,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=0,86 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятий геологічний інтервал – 620-631 м (5ГГ)											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9 11/8,75
Статистичні характеристики			11,03		11,26		2,7456		1,657		14,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=4,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шостий геологічний інтервал – 631-640 м											
Глибина, м	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3	
Статистичні характеристики			13,25		14,15		12,1181		3,4811		24,6
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=2,52 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сьомий геологічний інтервал – 640-646 м											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64				
Статистичні характеристики			9,75		10,98		20,5547		4,5337		41,3
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=0,719 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											

Продовження табл. 2.1

Восьмий геологічний інтервал 647-660 м											
Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76	14,25
Глибина, м	658	659	660								
H_B , м	11	12	13								
$V_{MEX,i}$, м/год	10,63	12,94	15,14								
Статистичні характеристики	$\bar{V}_{MEX}$, м / год За загл.		$\bar{V}_{MEX}$, м / год		D_V , (м / год) ²		σ_V , м / год		R_V , %		
	13,71		14,37		12,8587		3,5859		25		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=4,32 < \chi^2_{0,03;2} = 4,97$, ймовірність 0,97.											
Дев'ятий геологічний інтервал 663-670 м											
Глибина, м	663	664	665	666	667	668	669	670			
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7			
$V_{MEX,i}$, м/год	-	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01			
Статистичні характеристики	12,2		12,76		9,8265		3,1347		24,6		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=2,22 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Десятий геологічний інтервал 674-680 м											
Глибина, м	674	675	676	677	678	679	680				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33				
Статистичні характеристики	9,66		10,09		4,0399		2,01		19,9		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=2,75 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Одинадцятий геологічний інтервал 680-690 м											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	27,06
Статистичні характеристики	10,36		11,95		35,1648		5,93		49,6		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=5,67 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дванадцятий геологічний інтервал 690-700 м											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
Статистичні характеристики	13,22		13,7		7,7228		2,779		20,3		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=3,76 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03				
Статистичні характеристики	12,87		13,38		8,6165		2,9354		21,9		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=3,48 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											

Продовження табл. 2.1

Продовження табл. 2.1											
Тринадцятий геологічний інтервал 796-800 м, друга лінійна ділянка											
Глибина, м	796	797	798	799	800						
H_B , м	0	1	2	3	4						
$V_{MEX.i}$, м/год		6,08	9,22	11,50	9,79						
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, м / год За загл.		$\bar{V}_{MEX}$, м / год		D_V , (м / год) ²		σ_V , м / год		R_V , %
			8,65		9,15		5,1206		2,2629		24,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=2,19 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Чотирнадцятий геологічний інтервал 871-880 м											
Глибина, м	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25	
Статистичні характеристики			5,61		6,35		5,9844		2,4463		38,5
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=5,62 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятнадцятий геологічний інтервал 920-930 м											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
Статистичні характеристики			10,46		10,66		2,2231		1,491		14
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=2,66 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шістнадцятий геологічний інтервал 941-950 м											
Глибина, м	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX.i}$, м/год	-	16,80	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35	
Статистичні характеристики			10,07		10,58		8,2151		2,8662		27,1
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=2,12 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сімнадцятий геологічний інтервал 950-960 м											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
Статистичні характеристики			13,24		13,99		10,8631		3,2959		23,6
За критерієм згоди Пірсона при $k=6$ $\chi^2=7,51 < \chi^2_{0,05;2} = 7,8$											
Вісімнадцятий геологічний інтервал 1030-1040 м											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
Статистичні характеристики			8,27		8,5		2,4465		1,5641		18,4
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=2,65 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятнадцятий геологічний інтервал 1230-1240 м											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
Статистичні характеристики			9,81		10,38		6,6731		2,5832		24,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=0,51 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 2.2 – Статистичні характеристики вибірок механічної швидкості виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього значення $\bar{V}_{MEX}$ за заглибленням свердловини

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	$\bar{V}_{MEX}$, м / год За загл.	$\bar{V}_{MEX}$, м / год	D_V , (м / год) ²	σ_V , м / год	R_V , %
14ГІ – 871-880	5,61	6,35	5,9844	2,4463	38,5
18ГІ – 1030-1040	8,27	8,5	2,4465	1,5641	18,4
13ГІ.2 – 796-800	8,65	9,15	5,1206	2,2629	24,7
10ГІ – 674-680	9,66	10,09	4,0399	2,01	19,9
7ГІ – 640-647	9,75	10,98	20,5547	4,5337	41,3
19ГІ – 1230-1240	9,81	10,38	6,6731	2,5832	24,9
16ГІ – 941-950	10,07	10,58	8,2151	2,8662	27,1
16ГІ* – 942-950		9,81	3,1775	1,7826	18,12
11ГІ – 680-690	10,36	11,95	35,1648	5,93	49,6
15ГІ – 920-930	10,46	10,66	2,2231	1,491	14
5ГІ – 620-631	11,03	11,26	2,7456	1,657	14,7
9ГІ – 660-670	12,2	12,76	9,8265	3,1347	24,6
13ГІ.1 – 790-796	12,87	13,38	8,6165	2,9354	21,9
12ГІ – 690-700	13,22	13,7	7,7228	2,779	20,3
17ГІ – 1030-1040	13,24	13,99	10,8631	3,2959	23,6
6ГІ – 631-640	13,25	14,15	12,1181	3,4811	24,6
2ГІ – 490-500	13,36	13,90	8,7721	2,9618	21,3
8ГІ – 647-660	13,71	14,37	12,8587	3,5859	25
1ГІ – 480-490	14,27	15,20	19,1456	4,3756	28,8
4ГІ – 610-620	16,27	17,01	15,4536	3,3911	19,9
3ГІ – 580-590	18,66	20,03	28,5811	5,3461	26,7

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень механічної швидкості буріння керуватись положеннями методики згідно якої 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 тільки при $n \geq 10$. Якщо цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$ то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(\bar{V}_{MEX} - \Delta; \bar{V}_{MEX} + \Delta)$. Величина Δ визначається за формулою $\Delta = t_{KP} \cdot \sigma_V \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}}$, де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за прийнятим рівнем значущості α та числом ступенів вільності $\kappa = n-1$; n – об'єм сукупності значень $V_{mex,i}$.

Таблиця 2.3 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Позначення лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX}$, n	σ_V	t_{kp} і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX}$, n'	D'_V (D_V)	σ'_V (σ_V)	R_V , %
14ГІ	6,35; 9	2,4463	1,86 $\alpha=0,1$	4,796	1,55-11,15 Арт. відс.	-	(5,9844)	(2,4463)	37
18ГІ	8,5; 10	1,5641	2,26 $\alpha=0,05$	3,71	4,79-12,21 Арт. відс.	-	(2,4465)	(1,5641)	18,4
13ГІ.2	9,15; 4	2,2629	2,35 $\alpha=0,1$	5,94	3,21-15,09 Арт. відс.	-	(5,1206)	(2,2629)	24,7
10ГІ	10,09 6	2,01	2,01 $\alpha=0,1$	4,36	5,73-14,45 Арт. відс.	-	(4,0399)	(2,01)	19,9
19ГІ	10,38 10	2,5832	1,83 $\alpha=0,1$	4,96	5,42-15,34 Арт. відс.	-	(6,6731)	(2,5832)	24,9

Таблиця 2.3 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Позначення лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX};$ n	σ_V	t_{kp} і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX};$ n'	D'_V (D_V)	σ'_V (σ_V)	$R_V,$ %
16ГІ	10,58 9	2,8662	1,86 $\alpha=0,1$	5,62	4,96-16,2 Арт. 16,8	9,81 8	3,1775 $\chi^2=4,63 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$	1,7826	18,2
15ГІ	10,66 10	1,491	1,83 $\alpha=0,1$	2,86	7,8-13,52 Арт. відс.	-	(2,2231)	(1,491)	14
7ГІ	10,98 6	4,5337	2,01 $\alpha=0,1$	9,84	1,14-20,82 Арт. відс.	-	(20,5547)	(4,5337)	41,3
5ГІ	11,26 11	1,657	1,81 $\alpha=0,1$	3,13	8,13-14,39 Арт. відс.	-	(2,7456)	(1,657)	14,7
9ГІ	12,76 7	3,1347	1,94 $\alpha=0,1$	6,50	6,26-19,26 Арт. відс.	-	(9,8265)	(3,1347)	24,6
13ГІ.1	13,38 6	2,9354	2,01 $\alpha=0,1$	6,37	7,01-19,75 Арт. відс.	-	(8,6165)	(2,9354)	21,9
12ГІ	13,7 10	2,779	2,26 $\alpha=0,05$	6,59	7,11-20,29 Арт. відс.	-	(7,7228)	(2,779)	20,3
2ГІ	13,90 10	2,9618	1,83 $\alpha=0,1$	5,68	8,22-19,58 Арт. відс.	-	(8,7721)	(2,9618)	21,3
17ГІ	13,99 10	3,2959	1,83 $\alpha=0,1$	6,32	7,67-20,31 Арт. відс.	-	(10,8631)	(3,2959)	23,6
6ГІ	14,15 9	3,4811	1,86 $\alpha=0,1$	6,82	7,33-20,97 Арт. відс.	-	(12,1181)	(3,4811)	(24,6)
8ГІ	14,37 13	3,5859	2,68 $\alpha=0,02$	9,97	4,4-24,34 Арт. відс.	-	(12,8587)	(3,5859)	25
1ГІ	15,20; 10	4,3756	1,83 $\alpha=0,1$	8,40	6,8-23,6 Арт. 25,56	14,05; $n'=9$	6,6406 $\chi^2=0,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$	2,5769	18,3
4ГІ	17,01 10	3,3911	2,26 $\alpha=0,05$	8,04	8,97-25,05 Арт. відс.	-	(15,4536)	(3,3911)	19,9
3ГІ	20,03; 10	5,3461	1,83 $\alpha=0,1$	10,26	9,77-30,29 Арт. відс.	-	(28,5811)	(5,3461)	26,7

1. При $\alpha=0,1$ для вибірки 18ГІ значення 12,06 є артефактом. Це значення знаходиться всередині вибірки і не може бути відбраковане, тому що порушується цілісність вибірки. При $\alpha=0,05$ $t_{KP}=2,26$ і за цим значенням $\Delta=3,71$ і значення 12,06 не відбраковується.

2. Для вибірки 16ГІ артефактом є значення 16,8. Відбраковка цього значення зменшує величину лінійної ділянки на 1 м – 942-950 м (8м).

3. При $\alpha=0,1$ для вибірки 12ГІ значення 20,08 є артефактом. Це значення знаходиться всередині вибірки і не може бути відбраковане, тому що порушується цілісність вибірки. При $\alpha=0,05$ $t_{KP}=2,26$ і за цим значенням $\Delta=6,59$ і значення 20,08 не відбраковується.

4. При $\alpha=0,1$ для вибірки 8ГІ значення 22,29 і 21,33 є артефактами. Ці значення знаходяться всередині вибірки і не можуть бути відбраковані, тому що порушується цілісність вибірки. При $\alpha=0,02$ $t_{KP}=2,68$ і за цим значенням $\Delta=9,97$ і значення 22,29 і 21,33 не відбраковується.

5. Для вибірки 1ГІ артефактом є значення 25,56. Відбраковка цього значення зменшує величину лінійної ділянки на 1 м – 481-990 м (9м).

6. При $\alpha=0,1$ для вибірки 4ГІ значення 24,3 є артефактом. Це значення знаходиться всередині вибірки і не може бути відбраковане, тому що порушується цілісність вибірки. При $\alpha=0,05$ $t_{KP}=2,26$ і за цим значенням $\Delta=3,71$ і значення 12,06 не відбраковується.

Остаточний варіант статистичних характеристик вибірок значень механічної швидкості, з врахуванням виділення артефактів, наведено в табл.2.4

Доповнення до табл.2.3

Таблиця 2.3 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

Позначення лінійної ділянки (ЛД)	$\bar{V}_{MEX};$ n	σ_V	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX};$ n'	D'_V (D_V)	σ'_V (σ_V)	R_V , %
11ГІ	11,95 10	5,93	1,83 $\alpha=0,1$	11,38	0,57-23,33 Арт. 27,06	10,27 9	7,842	2,8004	18,2
$\chi^2=2,0 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$									

Таблиця 2.4 – Статистичні характеристики вибірок механічної швидкості виділених лінійних ділянок у порядку зростання середнього статистичного значення $\bar{V}_{MEX}$ з врахуванням відбраковки артефактів

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	Об'єм вибірки n	$\bar{V}_{MEX},$ $м / год$	$D_V,$ $(м / год)^2$	$\sigma_V,$ $м / год$	$R_V,$ %
14ГІ – 871-880	9	6,35	5,9844	2,4463	38,5
18ГІ – 1030-1040	10	8,5	2,4465	1,5641	18,4
13ГІ.2 – 796-800	4	9,15	5,1206	2,2629	24,7
16ГІ – 942-950	8	9,81	3,1775	1,7826	18,12
10ГІ – 674-680	6	10,09	4,0399	2,01	19,9
11ГІ – 680-689	9	10,27	7,8242	2,8004	27,3
19ГІ – 1230-1240	10	10,38	6,6731	2,5832	24,9
15ГІ – 920-930	10	10,66	2,2231	1,491	14
7ГІ – 640-646	6	10,98	20,5547	4,5337	41,3
5ГІ – 620-631	11	11,26	2,7456	1,657	14,7
9ГІ – 663-670	7	12,76	9,8265	3,1347	24,6
13ГІ.1 – 790-796	6	13,38	8,6165	2,9354	21,9
12ГІ – 690-700	10	13,7	7,7228	2,779	20,3
2ГІ – 490-500	10	13,90	8,7721	2,9618	21,3
17ГІ – 1030-1040	10	13,99	10,8631	3,2959	23,6
1ГІ – 480-490	9	14,05	6,6406	2,5769	18,3
6ГІ – 631-640	9	14,15	12,1181	3,4811	24,6
8ГІ – 647-660	13	14,37	12,8587	3,5859	25
4ГІ – 610-620	10	17,01	15,4536	3,3911	19,9
3ГІ – 580-590	10	20,03	28,5811	5,3461	26,7

За табл.2.1 для всіх вибірок значень механічної швидкості гіпотеза про нормальний закон розподілу цих значень підтверджена перевіркою критерія згоди Пірсона.

В табл. 2.5 наведено результати перевірки параметричних нульових гіпотез про рівність дисперсій і середніх значень вибірок $\bar{V}_{MEX}$, статистичні характеристики яких наведені в табл.2.4.

Таблиця 2.5 – Перевірка нульових гіпотез: $D_{V,j} = D_{V,k}$ та альтернативної $D_{V,j} \neq D_{V,k}$, $\alpha=0,01$ і

$\bar{V}_{MEX,j} = \bar{V}_{MEX,k}$ та альтернативної – $\bar{V}_{MEX,j} \neq \bar{V}_{MEX,k}$, $\alpha=0,05$

Позначення	$\bar{V}_{MEX},$ $м / год$	$D_V,$ $(м / год)^2$	n	F _{сп}	F _{кр}	$D_{V,j} = D_{V,k}$
				T _{сп}	T _{кр}	$\bar{V}_{MEX,j} = \bar{V}_{MEX,k}$
14ГІ	6,35	5,9844	9	2,45	5,47	D : Підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	2,31	2,11	$\bar{V}_{MEX}$: Не підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	2,09	6,99	D : Підтверджена
13ГІ.2	9,15	5,1206	4	0,6	2,18	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,3	5,62	D : Підтверджена
16ГІ	9,81	3,1775	8	1,66	2,12	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена

Таблиця 2.5 – Перевірка нульових гіпотез: $D_{V,j} = D_{V,k}$ та альтернативної $D_{V,j} \neq D_{V,k}$, $\alpha=0,01$ і

$\bar{V}_{MEX,j} = \bar{V}_{MEX,k}$ та альтернативної – $\bar{V}_{MEX,j} \neq \bar{V}_{MEX,k}$, $\alpha=0,05$

Позначення	$\bar{V}_{MEX},$ $m / \text{год}$	$D_V,$ $(m / \text{год})^2$	n	F _{СП}	F _{КР}	$D_{V,j} = D_{V,k}$
				T _{СП}	T _{КР}	$\bar{V}_{MEX,j} = \bar{V}_{MEX,k}$
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,65	6,06	D : Підтверджена
10ГІ	10,09	4,0399	6	1,65	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	3,2	5,47	D : Підтверджена
11ГІ	10,27	7,8242	9	1,73	2,11	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	2,73	5,35	D : Підтверджена
19ГІ	10,38	6,6731	10	1,97	2,1	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,1	5,35	D : Підтверджена
<u>15ГІ</u>	<u>10,66</u>	<u>2,2231</u>	<u>10</u>	<u>3,16</u>	<u>2,1</u>	$\bar{V}_{MEX}$: Не підтверджена
15ГІ	10,66	2,2231	10	9,24	6,06	D : Не підтверджена
7ГІ	10,98	20,5547	6			$\bar{V}_{MEX}$: Не перевірялась
15ГІ	10,66	2,2231	10	1,24	5,26	D : Підтверджена
5ГІ	11,26	2,7456	11	0,87	2,09	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
15ГІ	10,66	2,2231	10	4,42	5,8	D : Підтверджена
9ГІ	12,76	9,8265	7	1,86	2,13	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
15ГІ	10,66	2,2231	10	3,88	6,06	D : Підтверджена
<u>13ГІ.1</u>	<u>13,38</u>	<u>8,6165</u>	<u>6</u>	2,48	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Не підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,12	6,06	D : Підтверджена
12ГІ	13,7	7,7228	10	0,22	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,02	10,15	D : Підтверджена
2ГІ	13,90	8,7721	10	0,34	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,26	10,15	D : Підтверджена
17ГІ	13,99	10,8631	10	0,37	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,3	7,46	D : Підтверджена
1ГІ	14,05	6,6406	9	0,47	2,16	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,41	10,27	D : Підтверджена
6ГІ	14,15	12,1181	9	0,44	2,16	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,49	9,89	D : Підтверджена
8ГІ	14,37	12,8587	13	1,57	2,11	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,79	10,15	D : Підтверджена
4ГІ	17,01	15,4536	10	1,95	2,14	$\bar{V}_{MEX}$: Підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	3,32	10,15	D : Підтверджена
<u>3ГІ</u>	<u>20,03</u>	<u>28,5811</u>	<u>10</u>	<u>2,78</u>	<u>2,14</u>	$\bar{V}_{MEX}$: Не підтверджена

Спостережені значення критерію Стюдента визначається за формулою

$$T_{СП} = \frac{|\bar{V}_{MEX,j} - \bar{V}_{MEX,k}|}{\sqrt{(n_{V,j} - 1) \cdot D_{V,j} + (n_{V,k} - 1) \cdot D_{V,k}}} \sqrt{\frac{n_{V,j} \cdot n_{V,k} (n_{V,j} + n_{V,k} - 2)}{n_{V,j} + n_{V,k}}}$$

$$T_{СП} = \frac{|6,35 - 8,5|}{\sqrt{(9 - 1) \cdot 5,9844 + (10 - 1) \cdot 2,4465}} \sqrt{\frac{9 \cdot 10 (9 + 10 - 2)}{9 + 10}} 2,31 > 2,11$$

За табл.2.5 робимо наступні висновки:

1. вибірки 14ГІ і 18ГІ не належать до однієї генеральної сукупності;
2. Вибірки 18ГІ, 13ГІ.2, 16ГІ, 10ГІ, 11ГІ, 19ГІ (6 вибірок) можуть належати однієї ГС.
3. Вибірки 15ГІ, 5ГІ, 9ГІ (3-и вибірки) можуть належати однієї ГС.
4. 13ГІ.1, 2ГІ, 12ГІ, 17ГІ, 17ГІ, 1ГІ, 6ГІ, 8ГІ, 4ГІ (9 вибірок) можуть належати однієї ГС.
5. Вибірки 14ГІ і 3ГІ входять в окремі ГС.

Для того щоби об'єднати дискретні значення вибірок $\bar{V}_{MEX}$, які можуть належати до однієї ГС, потрібно провести перевірку статистичних нульових гіпотез для вибірок дискретних значень режимних параметрів, частоти обертання і осьового навантаження на долото, одержаних для відповідних геологічних інтервалів.

Методика перевірки цих гіпотез аналогічна методиці, яка наведена вище для дискретних значень механічної швидкості буріння, за винятком визначення артефактів.

В табл.2.6 наведені статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{mex.i} \cdot i \cdot n_d, x\bar{v}^{-1}$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-1240 м заглиблення свердловини, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 2.6 – Статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{mex.i} \cdot i \cdot n_d, x\bar{v}^{-1}$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-1240 м заглиблення свердловини

Перший геологічний інтервал – 480-490 м											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	25,56	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
n		42,72	45,12	44,40	45,60	45,84	46,56	45,84	46,80	47,04	47,76
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, $m / год$ За загл.		$\bar{n}_d, x\bar{v}^{-1}$		D_n , $(x\bar{v}^{-1})^2$		σ_n , $x\bar{v}^{-1}$		R_n , %
			14,27		46,11		1,072		1,0354		2,2
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=0,82 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Другий геологічний інтервал – 490-500 м											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
n		45,6	44,64	45,84	43,92	54,96	53,76	55,92	55,44	51,84	51,36
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, $m / год$ За загл.		$\bar{n}_d, x\bar{v}^{-1}$		D_n , $(x\bar{v}^{-1})^2$		σ_n , $x\bar{v}^{-1}$		R_n , %
			13,36		50,33		23,3222		4,8293		9,6
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=6,39 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97											
Третій геологічний інтервал – 580-590 м											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
n		67,18	70,23	67,94	70,23	57,3	58,82	59,07	58,82	57,3	58,82
Статистичні характеристики			18,66		62,57		30,8248		5,552		8,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=11,7 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97											

Продовження табл. 2.6

Четвертий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
n	-	55,01	56,28	53,24	51,97	56,79	60,08	61,1	59,32	58,06	59,07
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, $m / 200$ За загл.		$\bar{n}_d, x\theta^{-1}$		D_n , $(x\theta^{-1})^2$		σ_n , $x\theta^{-1}$		R_n , %
			16,27		57,09		8,996		2,9993		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=2,43 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятий геологічний інтервал – 620-631 м (5ГГ)											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9
n	-	59,32	61,61	59,32	48,17	45,63	43,61	45,13	46,39	46,9	11/8,75
											47,92
											11/44,37
Статистичні характеристики			11,03		50,4		46,7645		6,8385		13,6
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=7,6 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97											
Шостий геологічний інтервал – 631-640 м											
Глибина, м	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3	
n	-	58,56	58,06	58,82	59,83	59,32	58,06	55,52	59,83	60,08	
Статистичні характеристики			13,25		57,24		22,2208		4,7139		8,2
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=11,2 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Сьомий геологічний інтервал – 640-646 м											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64				
n	-	59,07	59,07	56,54	57,04	58,82	58,82				
Статистичні характеристики			9,75		58,23		1,2759		1,1296		1,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=9,88 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Восьмий геологічний інтервал 647-660 м											
Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76	14,25
Глибина, м	658	659	660								
H_B , м	11	12	13								
$V_{MEX,i}$, м/год	10,63	12,94	15,14								
n	-	56,28	57,8	58,31	57,8	46,65	57,55	59,07	59,58	59,07	57,8
	59,58	55,52	56,54								
Статистичні характеристики			13,71		57,04		11,3201		3,3201		5,8
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=11,3 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97.											

Продовження табл. 2.6

Продовження табл. 2.0											
Дев'ятий геологічний інтервал 663-670 м											
Глибина, м	663	664	665	666	667	668	669	670			
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7			
$V_{MEX.i}$, м/год	-	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01			
n	-	56,28	55,27	57,3	57,3	57,55	54,76	58,56			
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$, м / год За загл.		$\bar{n}_d, x\bar{v}^{-1}$		D_n , $(x\bar{v}^{-1})^2$		σ_n , $x\bar{v}^{-1}$		R_n , %
			12,2		56,72		1,8265		1,3515		2,4
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=1,2 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Десятий геологічний інтервал 674-680 м											
Глибина, м	674	675	676	677	678	679	680				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX.i}$, м/год	-	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33				
n	-	61,1	62,37	59,32	59,07	62,11	61,86				
Статистичні характеристики			9,66		60,97		2,0802		1,4423		2,4
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=5,04 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Одинадцятий геологічний інтервал 680-690 м											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	27,06
n	-	69,21	70,23	70,99	70,73	71,24	68,2	68,45	69,49	68,96	70,99
Статистичні характеристики			10,36		69,85		1,2762		1,1297		1,6
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=6,3 < \chi^2_{0,03;2} = 7,0$ ймовірність 0,97											
Дванадцятий геологічний інтервал 690-700 м											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
n	-	52,23	68,45	66,68	67,69	67,44	67,44	63,89	68,45	64,39	66,68
Статистичні характеристики			13,22		65,33		23,5727		4,8552		7,4
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=7,6 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX.i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03				
n	-	56,79	59,07	56,54	60,85	57,04	54,25				
Статистичні характеристики			12,87		57,42		5,1704		2,2738		4,0
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=3,48 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Тринадцятий геологічний інтервал 796-800 м, друга лінійна ділянка											
Глибина, м	796	797	798	799	800						
H_B , м	0	1	2	3	4						
$V_{MEX.i}$, м/год		6,08	9,22	11,50	9,79						
n	-	55,52	55,52	56,28	56,79						
Статистичні характеристики			8,65		56,03		0,3868		0,6219		1,1
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=1,54 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											

Продовження табл. 2.6

Чотирнадцятий геологічний інтервал 871-880 м											
Глибина, м	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25	
n	58,31	59,58	59,32	58,06	59,07	56,79	58,82	58,56	58,82	56,03	
Статистичні характеристики	5,61			58,34			1,262		1,1234		1,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=2,6 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятнадцятий геологічний інтервал 920-930 м											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
n	-	60,08	59,83	58,32	58,82	58,56	59,83	58,31	59,83	60,59	60,85
Статистичні характеристики	10,46			59,5			0,8724		0,934		1,6
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=2,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шістнадцятий геологічний інтервал 941-950 м											
Глибина, м	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEH,i}$, м/год	-	16,80	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35	
n	-	61,61	59,32	59,32	57,3	57,8	56,28	56,54	59,07	56,03	
Статистичні характеристики	10,07			58,14			3,3729		1,8366		3,2
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=2,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сімнадцятий геологічний інтервал 950-960 м											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
n	-	56,03	58,31	56,28	55,01	57,55	57,8	54,25	58,82	60,85	62,87
Статистичні характеристики	13,24			57,78			6,9106		2,6288		4,5
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=0,7 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Вісімнадцятий геологічний інтервал 1030-1040 м											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
n	-	65,66	67,18	63,13	65,92	61,61	64,65	63,13	62,37	63,38	64,65
Статистичні характеристики	8,27			64,17			3,0427		1,7443		2,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=0,38 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятнадцятий геологічний інтервал 1230-1240 м											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
n	-	59,83	59,58	57,8	69,72	66,68	59,58	66,42	66,68	63,13	60,34
Статистичні характеристики	9,81			62,98			16,8342		4,103		6,5
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=3,2 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 2.7 – Статистичні характеристики вибірок частоти обертання долота $n_{d,i}, \text{хв}^{-1}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Позначення	об'єм вибірки	$\bar{V}'_{\text{МЕХ}}$		$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$D_n, (\text{хв}^{-1})^2$	$\sigma_n, \text{хв}^{-1}$	$R_n, \%$	
14ГІ – 871-880	9	6,35		58,34	1,262	1,1234	1,9	2,6<5,9
18ГІ – 1030-1040	10	8,5		64,17	3,0427	1,7443	2,7	0,38<5,9
13ГІ.2 – 796-800	4	9,15		56,03	0,3868	0,6219	1,1	1,54<3,8
16ГІ – 942-950	8	9,81		58,14	3,3729	1,8366	3,2	2,1<5,9
10ГІ – 674-680	6	10,09		60,97	2,0802	1,4423	2,4	<u>5,04>4,7</u>
11ГІ – 680-690	10	10,27		69,85	1,2762	1,1297	1,6	6,3<7,0
19ГІ – 1230-1240	10	10,38		62,98	16,8342	4,103	6,5	3,2<5,9
15ГІ – 920-930	10	10,66		59,5	0,8724	0,934	1,6	2,1<5,9
7ГІ – 640-646	6	10,98		58,23	1,2759	1,1296	1,9	<u>9,88>4,7</u>
5ГІ – 620-631	11	11,26		50,4	46,7645	6,8385	13,6	<u>7,6>4,7</u>
9ГІ – 663-670	7	12,76		56,72	1,8265	1,3515	2,4	1,2<3,8
13ГІ.1 – 790-796	6	13,38		57,42	5,1704	2,2738	4,0	3,48<3,8
12ГІ – 690-700	10	13,7		65,33	23,5727	4,8552	7,4	<u>7,6>4,7</u>
2ГІ – 490-500	10	13,90		50,33	23,3222	4,8293	9,6	<u>6,39>4,7</u>
17ГІ – 1030-1040	10	13,99		57,78	6,9106	2,6288	4,5	0,7<5,9
1ГІ – 480-490	9	14,05		46,11	1,072	1,0354	2,2	0,82<5,9
6ГІ – 631-640	9	14,15		57,24	22,2208	4,7139	8,2	<u>11,2>4,7</u>
8ГІ – 647-660	13	14,37		57,04	11,3201	3,3201	5,8	<u>11,3>4,7</u>
4ГІ – 610-620	10	17,01		57,09	8,966	2,9993	5,2	2,43<5,9
3ГІ – 580-590	10	20,03		62,52	30,8248	5,5552	8,9	<u>11,7>4,7</u>

Таблиця 2.8 – Перевірка нульових $D_{n,j} = D_{n,k}, \alpha = 0,01; \bar{n}_j = \bar{n}_k, \alpha = 0,05$ та альтернативних

$D_{n,j} \neq D_{n,k}, \alpha = 0,01; \bar{n}_j \neq \bar{n}_k, \alpha = 0,05$ гіпотез

№ виб.	$\bar{n}_d, \text{хв}^{-1}$	$D_n, (\text{хв}^{-1})^2$	N	$F_{\text{СП}} < F_{\text{КР}}$	Нульова гіпотеза $D_{n.x} = D_{n.y}$	Перевірка умови $T_{\text{СП}} < T_{\text{КР}}$	Нульова гіпотеза $\bar{n}_{d.x} = \bar{n}_{d.y}$
18ГІ	64,17	3,0427	10	-	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 10ГІ відхилена		
10ГІ	60,97	2,0802	6				
18ГІ	64,17	3,0427	10	2,38<5,35	Підтверджена	8,64>2,1	Не підтверджена
11ГІ	69,85	1,2762	10	7,87<27,34	Підтверджена	8,9>2,18	Не підтверджена
18ГІ	64,17	3,0427	10		1,1<5,62	Підтверджена	7,1>2,12
13ГІ.2	56,03	0,3868	4	5,53>5,35		Не перевірялась	
18ГІ	64,17	3,0427	10				
16ГІ	58,14	3,3729	8	Не підтверджена	Не перевірялась		
18ГІ	64,17	3,0427	10				
19ГІ	62,98	16,8342	10	Вибірki 18ГІ, 13ГІ.2, 16ГІ, 10ГІ, 11ГІ і 19ГІ не належать до однієї ГС			
15ГІ	59,5	0,8724	10	<u>7,6>4,7</u>	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 5ГІ відхилена		
5ГІ	50,4	46,7645	10				
15ГІ	59,5	0,8724	10	2,09<5,8	Підтверджена	5,04>2,13	Не підтверджена
9ГІ	56,72	1,8265	7	Вибірki 15ГІ, 5ГІ і 9ГІ не належать до однієї ГС			
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	<u>7,6>4,7</u>	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 12ГІ відхилена		
12ГІ	65,33	23,5727	10				
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	<u>6,39>4,7</u>	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 2ГІ відхилена		
2ГІ	50,33	23,3222	10				
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	0,76<10,15	Підтверджена	0,28<2,12	Підтверджена
17ГІ	57,78	6,9106	10				

Таблиця 2.8 – Перевірка нульових $D_{n,j} = D_{n,k}$, $\alpha = 0,01$; $\bar{n}_j = \bar{n}_k$, $\alpha = 0,05$ та альтернативних $D_{n,j} \neq D_{n,k}$, $\alpha = 0,01$ $\bar{n}_j \neq \bar{n}_k$, $\alpha = 0,05$ гіпотез

№ виб.	$\bar{n}_d, x\sigma^{-1}$	$D_n, (x\sigma^{-1})^2$	N	$F_{СП} < F_{КР}$	Нульова гіпотеза $D_{n.x} = D_{n.y}$	Перевірка умови $T_{СП} < T_{КР}$	Нульова гіпотеза $\bar{n}_{d.x} = \bar{n}_{d.y}$
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	4,82<6,06	Підтверджена	13,2>2,16	Не підтверджена
1ГІ	46,11	1,072	9				
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	<u>11,2>4,7</u>	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 6ГІ відхилена		
6ГІ	57,24	22,2208	9				
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	<u>11,3>4,7</u>	Гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки 8ГІ відхилена		
8ГІ	57,04	11,3201	13				
13ГІ.1	57,42	5,1704	6	1,73<10,15	Підтверджена	0,23<2,14	Підтверджена
4ГІ	57,09	8,966	10				
Вибірki 13ГІ.1, 17ГІ і 4ГІ можуть належати до однієї ГС							

В табл.2.9 наведені статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{мех.i}$ і $F_{ДОЛ,мс}$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-1240 м заглиблення свердловини, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 2.9 – Статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{мех.i}$ і $F_{ДОЛ,мс}$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 450-1240 м заглиблення свердловини

Перший геологічний інтервал – 480-490 м											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	<u>25,56</u>	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
$F_{ДОЛ}, mc$	-	-	1,95	1,92	2,32	2,12	2,0	2,26	2,46	2,06	1,3
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$, м / год За загл.		$\bar{F}_{ДОЛ}, mc$		D_F		σ_F		R_F , %
			14,27		2,04		0,1102		0,332		16,3
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Другий геологічний інтервал – 490-500 м											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
$F_{ДОЛ}, mc$	-	2,2	1,89	1,55	2,26	2,35	1,75	1,95	1,98	2,23	1,87
Статистичні характеристики			13,36		2,0		0,0644		0,2538		12,7
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=2,8 < \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97											
Третій геологічний інтервал – 580-590 м											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
$F_{ДОЛ}, mc$	-	1,21	0,79	1,47	1,41	0,38	1,15	1,81	1,09	1,98	2,23
Статистичні характеристики			18,66		1,35		0,3092		0,556		41,1
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,0 < \chi^2_{0,03;2} = 5,9$											

Продовження табл. 2.9

Четвертий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
$F_{ДОЛ}, тс$	-	1,31	1,22	1,88	1,57	1,6	1,66	0,68	1,0	1,99	0,71
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$, м / год За загл.		$\bar{F}_{ДОЛ}, тс$		D_F		σ_F		R_F , %
			16,27		1,362		0,2106		0,4589		33,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,39 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятий геологічний інтервал – 620-631 м (5ГГ)											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9
$F_{ДОЛ}, тс$	-	1,09	0,88	1,39	2,62	2,23	2,08	2,17	1,69	1,69	11/8,75
											1,54
											11/2,17
Статистичні характеристики			11,03		1,78		0,2814		0,5305		29,8
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,5 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шостий геологічний інтервал – 631-640 м											
Глибина, м	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEH,i}$, м/год	-	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3	
$F_{ДОЛ}, тс$	-	1,89	2,17	2,14	2,53	1,21	1,51	2,2	1,6	1,77	
Статистичні характеристики			13,25		1,89		0,169		0,4111		21,8
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=0,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сьомий геологічний інтервал – 640-646 м											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64				
$F_{ДОЛ}, тс$	-	1,8	1,54	1,23	1,69	1,74	1,26				
Статистичні характеристики			9,75		1,54		0,0609		0,2462		16
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ <u>$\chi^2=5,3 > \chi^2_{0,05;2} = 4,7$</u> , ймовірність 0,97											
Восьмий геологічний інтервал 647-660 м											
Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76	14,25
Глибина, м	658	659	660								
H_B , м	11	12	13								
$V_{MEH,i}$, м/год	10,63	12,94	15,14								
$F_{ДОЛ}, тс$	-	1,15	1,69	1,4	1,72	1,46	2,08	1,51	1,8	1,48	1,51
	1,46	1,83	1,37								
Статистичні характеристики			13,71		1,5738		0,0585		0,2419		15,4
За критерієм згоди Пірсона при $k=4$ $\chi^2=0,8 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$,											

Продовження табл. 2.9

Продовження табл. 2.9											
Дев'ятий геологічний інтервал 663-670 м											
Глибина, м	663	664	665	666	667	668	669	670			
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7			
$V_{MEH,i}$, м/год	-	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01			
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,74	1,43	1,37	1,4	1,09	1,12	1,03			
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$ За загл.		$\bar{F}_{ДОЛ},mc$		D_F		σ_F		R_F , %
			12,2		1,31		0,0623		0,2496		19
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=0,8 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Десятий геологічний інтервал 674-680 м											
Глибина, м	674	675	676	677	678	679	680				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEH,i}$, м/год	-	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33				
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,28	1,54	1,99	1,8	1,69	1,34				
Статистичні характеристики			9,66		1,61		0,0747		0,2733		17
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=0,5 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Одинадцятий геологічний інтервал 680-690 м											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	<u>27,06</u>
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,34	1,09	1,23	1,43	0,95	1,72	1,4	1,34	2,43	
Статистичні характеристики			10,36		1,44		0,1859		0,4311		29,9
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,7 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дванадцятий геологічний інтервал 690-700 м											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,37	0,67	1,34	1,23	1,23	1,4	1,57	1,72	1,34	1,74
Статистичні характеристики			13,22		1,36		0,0923		0,3038		22,2
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,0 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEH,i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03				
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,18	1,63	1,18	0,92	1,06	1,29				
Статистичні характеристики			12,87		1,21		0,0582		0,2413		19,9
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=0,3 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Тринадцятий геологічний інтервал 796-800 м, друга лінійна ділянка											
Глибина, м	796	797	798	799	800						
H_B , м	0	1	2	3	4						
$V_{MEH,i}$, м/год		6,08	9,22	11,50	9,79						
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,29	1,78	1,95	1,03						
Статистичні характеристики			8,65		1,51		0,1818		0,4263		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=3,7 < \chi^2_{0,03;2} = 4,7$, ймовірність 0,97											

Продовження табл. 2.9

Чотирнадцятий геологічний інтервал 871-880 м											
Глибина, м	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25	
$F_{ДОЛ}, mc$	-	1,17	1,31	1,48	1,28	1,66	1,71	1,66	1,48	1,57	
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$ За загл.		$\bar{F}_{ДОЛ}, mc$		D_F		σ_F		R_F , %
			5,61		1,48		0,0363		0,1907		12,9
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=2,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятнадцятий геологічний інтервал 920-930 м											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
$F_{ДОЛ}, mc$	-	1,24	1,67	1,93	1,98	1,42	1,5	1,33	1,87	1,81	1,39
Статистичні характеристики			10,46		1,61		0,0736		0,2713		16,8
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=4,3 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шістнадцятий геологічний інтервал 941-950 м											
Глибина, м	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	16,80	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35	
$F_{ДОЛ}, mc$	-	-	1,78	1,18	1,5	1,18	1,36	1,53	1,25	1,95	
Статистичні характеристики			10,07		1,47		0,0799		0,2827		19,2
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=0,7 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сімнадцятий геологічний інтервал 950-960 м											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
$F_{ДОЛ}, mc$	-	1,53	1,36	1,56	1,82	1,44	1,47	1,82	1,56	2,04	1,73
Статистичні характеристики			13,24		1,633		0,045		0,212		13
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,2 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Вісімнадцятий геологічний інтервал 1030-1040 м											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
$F_{ДОЛ}, mc$	-	1,98	1,91	2,2	2	2	1,94	2	2,22	2,05	1,73
Статистичні характеристики			8,27		2,0		0,0195		0,1398		7
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=3,5 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятнадцятий геологічний інтервал 1230-1240 м											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
$F_{ДОЛ}, mc$	-	2,62	2,69	2,66	1,85	1,58	2,91	2,03	1,51	3,54	2,73
Статистичні характеристики			9,81		2,41		0,419		0,6473		26,8
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 2.10 – Статистичні характеристики вибірок осьового навантаження на долото $F_{\text{ДОЛ}}, \text{mc}$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Позначення	об'єм вибірки	$\bar{V}_{\text{MEH}}$	$F_{\text{ДОЛ}}, \text{mc}$	D_F	σ_F	$R_F, \%$
14П – 871-880	9	6,35	1,48	0,0363	0,1907	12,9
18П – 1030-1040	10	8,5	2,0	0,0195	0,1398	7
13П.2 – 796-800	4	9,15	1,51	0,1818	0,4263	28,3
16П – 942-950	8	9,81	1,47	0,0799	0,2827	19,2
10П – 674-680	6	10,09	1,61	0,0747	0,2733	17
11П – 680-690	10	10,27	1,44	0,1859	0,4311	29,9
19П – 1230-1240	10	10,38	2,41	0,419	0,6473	26,8
15П – 920-930	10	10,66	1,61	0,0736	0,2713	16,8
7П – 640-646	6	10,98	1,54	0,0609	0,2462	16
5П – 620-631	11	11,26	1,78	0,2814	0,5305	29,8
9П – 663-670	7	12,76	1,31	0,0623	0,2496	19
13П.1 – 790-796	6	13,38	1,21	0,0582	0,2413	19,9
12П – 690-700	10	13,7	1,36	0,0923	0,3038	22,2
2П – 490-500	10	13,90	2,0	0,0644	0,2538	12,7
17П – 1030-1040	10	13,99	1,63	0,045	0,212	13
1П – 480-490	9	14,05	2,04	0,1102	0,332	16,3
6П – 631-640	9	14,15	1,89	0,169	0,4111	21,8
8П – 647-660	13	14,37	1,57	0,0585	0,2419	15,4
4П – 610-620	10	17,01	1,36	0,2106	0,4589	33,7
3П – 580-590	10	20,03	1,35	0,3092	0,556	41,1

В табл.2.11 наведені статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{\text{мех.і}} \cdot i W_{\text{П}}, \text{H} \cdot \text{м} / \text{см}^3$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 480-1240 м заглиблення свердловини, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 2.11 – Статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{\text{мех.і}} \cdot i \cdot W_{\text{П}} \cdot H \cdot \text{м} / \text{см}^3$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 480-1240 м заглиблення свердловини

Перший геологічний інтервал – 480-490 м											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	<u>25,56</u>	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
W_{II} , Н·м/см ³	-	-	1772	3062	2176	3122	1235	2275	1545	1786	757
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$ За загл.		$\bar{W}_{II}$, Н·м/см ³		D_W		σ_W		R_W , %
			14,27		1970		615038,5				
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=0,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Другий геологічний інтервал – 490-500 м											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
W_{II} , Н·м/см ³	-	2961	2334	1464	3124	1659	3440	1346	794	2284	536
Статистичні характеристики			13,36		1994		986821		993		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=5,6 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Третій геологічний інтервал – 580-590 м											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
W_{II} , Н·м/см ³	-	3148	1836	2387	2281	2414	3435	1801	1563	1539	1153
Статистичні характеристики			18,66		2156		524613		724		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=3,6 < \chi^2_{0,03;2} = 5,9$											
Четвертий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
W_{II} , Н·м/см ³	-	2546	1752	2739	2301	2233	1539	308	1729	1336	1080
Статистичні характеристики			16,27		1756		543651		737		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=3,3 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9 11/8,75
W_{II} , Н·м/см ³	-	2440	1927	2952	1732	2430	2113	2474	2374	1611	1281 11/3556
Статистичні характеристики			11,03		2263		407250		638		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=1,3 < \chi^2_{0,03;2} = 5,9$											

Продовження табл. 2.11

Шостий геологічний інтервал – 631-640 м											
Глибина, м	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3	
W_{II} , Н·м/см ³	-	2842	2758	1980	1542	1086	2688	2534	2747	1536	
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$ За загл.		$\bar{W}_{II}$, Н·м/см ³		D_W		σ_W		R_W , %
			13,25		2190		441856		665		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=5,9>\chi^2_{0,03;2}=4,7$											
Сьомий геологічний інтервал – 640-646 м											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64				
W_{II} , Н·м/см ³	-	2416	2470	2708	1842	2748	1952				
Статистичні характеристики			9,75		2356		144315		380		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=2,6<\chi^2_{0,05;2}=3,8$											
Восьмий геологічний інтервал 647-660 м											
Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76	14,25
Глибина, м	658	659	660								
H_B , м	11	12	13								
$V_{MEX,i}$, м/год	10,63	12,94	15,14								
W_{II} , Н·м/см ³	-	3505	1268	3694	2114	2692	2978	1995	1363	2763	3007
	3607	3225	2553								
Статистичні характеристики			13,71		2674		633453		796		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,6<\chi^2_{0,05;2}=5,9$											
Дев'ятий геологічний інтервал 663-670 м											
Глибина, м	663	664	665	666	667	668	669	670			
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7			
$V_{MEX,i}$, м/год	-	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01			
W_{II} , Н·м/см ³	-	4611	1838	2942	1377	2177	3455	1019			
Статистичні характеристики			12,2		2488		1593305		1262		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=0,8<\chi^2_{0,05;2}=3,8$											
Десятий геологічний інтервал 674-680 м											
Глибина, м	674	675	676	677	678	679	680				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33				
W_{II} , Н·м/см ³	-	5997	1737	1978	3764	2253	2941				
Статистичні характеристики			9,66		3112		2538406		1593		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=1,7<\chi^2_{0,05;2}=3,8$											

Продовження табл. 2.11

Продовження табл. 3.11											
Одинадцятий геологічний інтервал 680-690 м											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	27,06
W_{II} , Н·м/см ³	-	5724	5217	4637	6100	2276	4718	3154	4409	4092	-
Статистичні характеристики		10,36			4481		1445984		1202		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=0,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дванадцятий геологічний інтервал 690-700 м											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
W_{II} , Н·м/см ³	-	1565	1031	3481	2938	3069	4376	3517	1681	1255	909
Статистичні характеристики		13,22			2382		1519679		1233		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,0 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX.i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03				
W_{II} , Н·м/см ³	-	2122	1548	2349	2074	2374	1899				
Статистичні характеристики		12,87			2061		94843		308		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=0,6 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Тринадцятий геологічний інтервал 796-800 м, друга лінійна ділянка											
Глибина, м	796	797	798	799	800						
H_B , м	0	1	2	3	4						
$V_{MEX.i}$, м/год		6,08	9,22	11,50	9,79						
W_{II}	-	7240	5463	2807	2527						
Статистичні характеристики		8,65			4509		5064535		2250		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=1,5 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Чотирнадцятий геологічний інтервал 871-880 м											
Глибина, м	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25	
W_{II}	-	2238	3005	5796	5034	12496	7095	2567	3051	2747	
Статистичні характеристики		5,61			4892		10938978		3307		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятнадцятий геологічний інтервал 920-930 м											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
W_{II}	-	4431	6575	5753	6624	1804	5062	3720	2660	1878	2750
Статистичні характеристики		10,46			4126		3389601		1841		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=5,5 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Продовження табл. 2.11

Шістнадцятий геологічний інтервал 941-950 м											
Глибина, м	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEH,i}$, м/год	-	<u>16,80</u>	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35	
W_{II} , Н·м/см ³	-	-	2300	3177	3600	1809	3689	1745	3312	5486	
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$ За загл.		$\bar{W}_{II}$, Н·м/см ³		D_W		σ_W		R_W , %
			10,07		3140		1495729		1223		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=3 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Сімнадцятий геологічний інтервал 950-960 м											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
W_{II} , Н·м/см ³	-	4914	1398	2298	1656	1614	2976	2585	5311	1501	1517
Статистичні характеристики			13,24		2577		2067844		1438		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=5,3 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Вісімнадцятий геологічний інтервал 1030-1040 м											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
W_{II} , Н·м/см ³	-	3955	3678	5560	2696	5486	4532	3198	5272	4077	5321
Статистичні характеристики			8,27		4378		1036324		1018		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=5,2 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятнадцятий геологічний інтервал 1230-1240 м											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
W_{II} , Н·м/см ³	-	5796	6229	6410	7526	11464	9727	2676	2810	9168	4866
Статистичні характеристики			9,81		6667		8271376		2876		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5$ $\chi^2=1,6 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 2.12 – Статистичні характеристики вибірок енергоємності $\bar{W}_{II}$, за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

Позначення	об'єм вибірки	$\bar{V}_{MEH}$	$\bar{W}_{II}$, Н·м/см ³	D_W	σ_W	R_W , %
14ГІ – 871-880	9	6,35	4892	10936249	3307	67,6
18ГІ – 1030-1040	10	8,5	4378	1036324	1018	23,2
13ГІ.2 – 796-800	4	9,15	4509	5064535	2250	49,9
16ГІ – 942-950	8	9,81	3140	1495729	1223	38,9
10ГІ – 674-680	6	10,09	3112	2537649	1593	
11ГІ -680-690	10	10,27	4481	1444804	1202	
19ГІ – 1230-1240	10	10,38	6667	8271376	2876	43,1
15ГІ – 920-930	10	10,66	4126	3389281	1841	44,6
7ГІ – 640-646	6	10,98	2356	144400	380	
5ГІ – 620-631	11	11,26	2263	407044	638	
9ГІ – 663-670	7	12,76	2488	1592644	1262	
13ГІ.1 – 790-796	6	13,38	2061	94864	308	
12ГІ – 690-700	10	13,7	2382	1520289	1233	
2ГІ – 490-500	10	13,90	1994	986049	993	
17ГІ – 1030-1040	10	13,99	2577	2067844	1438	55,8
1ГІ – 480-490	9	14,05	1970	614656	784	
6ГІ – 631-640	9	14,15	2190	442225	665	
8ГІ – 647-660	13	14,37	2674	633616	796	
4ГІ – 610-620	10	17,01	1756	543169	737	
3ГІ – 580-590	10	20,03	2156	524176	724	

В табл.2.13 наведені статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{MEH,i} \cdot i \cdot T_p, \kappa H \cdot m$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 480-1240 м заглиблення свердловини, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 2.13 – Статистичні характеристики вибірок дискретних значень $V_{MEH,i} \cdot i \cdot T_p, \kappa H \cdot m$ для однорідних лінійних ділянок в порядку зростання за аналізованому інтервалі 480-1240 м заглиблення свердловини

Перший геологічний інтервал – 480-490 м											
Глибина, м	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	<u>25,56</u>	13,37	10,57	15,47	10,28	14,52	13,86	16,31	18,39	13,7
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	-	5,1	7,08	7,17	6,8	3,74	6,68	5,23	6,78	2,11
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEH}$, $m / год$ За загл.		$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$		D_T		σ_T		R_T , %
			14,27		5,63 2,11-7,17		3,0839		1,7561		
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=3,8 < \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Другий геологічний інтервал – 490-500 м											
Глибина, м	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEH,i}$, м/год	-	10,99	14,02	15,25	10,51	11,46	10,91	15,78	19,34	16,92	13,8
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,93	7,12	4,73	7,26	3,36	6,78	3,69	2,69	7,24	1,4
Статистичні характеристики			13,36		5,12 1,4-7,26		4,9048		2,2147		12,7
За критерієм згоди Пірсона при $k=4 \chi^2=4,97 > \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											

Продовження табл. 2.13

Продовження табл. 2.15											
Третій геологічний інтервал – 580-590 м											
Глибина, м	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,46	19,46	18,76	23,18	13,05	12,8	24,6	28,25	24,96	20,80
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,58	4,94	6,4	7,31	5,34	7,26	7,29	7,29	6,51	3,96
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$ За загл.		$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$		D_T		σ_T		R_T
			14,27		6,288 3,96-7,31		1,3644		1,1681		18,6
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Четвертий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	14,13	15,55	13,55	14,00	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,35	4,7	6,77	6,02	6,2	3,07	1,19	5,34	4,88	3,43
Статистичні характеристики			16,27		4,795 1,19-6,77		3,1046		1,1759		24,5
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,6 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятий геологічний інтервал – 610-620 м											
Глибина, м	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	12,87	11,82	10,8	13,32	12,78	10,33	12,85	9,74	11,72	8,9 11/8,75
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	5,14	3,59	5,22	4,65	6,61	4,86	6,84	4,84	3,91	10/2,31 11/6,81
Статистичні характеристики			11,03		4,98 2,31-6,84		1,9897		1,4106		28,3
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=1,2 < \chi^2_{0,03;2} = 5,9$											
Шостий геологічний інтервал – 631-640 м											
Глибина, м	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,16	15,89	15,88	18,06	17,67	13,57	16,47	10,36	8,3	
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	5,26	7,33	5,19	4,52	3,14	6,2	7,3	4,62	2,06	
Статистичні характеристики			13,25		5,0578 2,06-7,33		3,0601		1,7494		34,6
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=1,0 < \chi^2_{0,03;2} = 5,9$											
Сьомий геологічний інтервал – 640-646 м											
Глибина, м	640	641	642	643	644	645	646				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,71	13,2	10,17	19,04	8,11	6,64				
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	3,46	5,36	4,73	5,97	3,68	2,14				
Статистичні характеристики			9,75		4,2233 2,14-5,97		1,9342		1,3907		32,9
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=1,2 > \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											

Продовження табл. 2.13

Восьмий геологічний інтервал 647-660 м											
Глибина, м	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	11,97	12,34	10,55	14,19	13,1	14,29	22,29	21,33	13,76	14,25
Глибина, м	658	659	660								
H_B , м	11	12	13								
$V_{MEX.i}$, м/год	10,63	12,94	15,14								
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	7,24	2,63	6,49	5,04	7,34	7,18	7,31	4,74	6,25	7,1
	6,25	7,3	6,64								
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$ За загл.		$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$		D_T		σ_T		R_T
			14,27		6,2777 2,63-7,34		1,9342		1,3907		18,6
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=10,3 > \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятий геологічний інтервал 663-670 м											
Глибина, м	663	664	665	666	667	668	669	670			
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7			
$V_{MEX.i}$, м/год	-	9,1	19,07	13,92	12,43	11,35	11,44	12,01			
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	7,24	6,16	6,94	2,9	4,17	7,01	2,03			
Статистичні характеристики			12,2		5,2071 2,03-7,24		4,6311		2,152		41,3
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=5,4 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Десятий геологічний інтервал 674-680 м											
Глибина, м	674	675	676	677	678	679	680				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX.i}$, м/год	-	6,41	10,24	9,79	11,83	11,95	10,33				
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,11	2,77	3,17	7,32	4,21	4,77				
Статистичні характеристики			9,66		4,725 2,77-7,32		3,0319		1,7412		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4 \chi^2=0,3 < \chi^2_{0,05;2} = 3,8$											
Одинадцятий геологічний інтервал 680-690 м											
Глибина, м	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	8,38	9,01	7,52	7,45	9,42	10,54	16,16	11,34	12,6	<u>27,06</u>
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,73	6,5	4,77	6,24	2,92	7,08	7,23	6,99	7,26	-
Статистичні характеристики			10,36		6,1911 2,92-7,26		2,0948		1,4473		
<u>За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=10,9 > \chi^2_{0,05;2} = 5,9$</u>											
Дванадцятий геологічний інтервал 690-700 м											
Глибина, м	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX.i}$, м/год	-	9,14	14,36	14,36	12,6	14,3	11,3	13,62	14,13	20,08	13,2
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	2,66	2,1	7,28	5,31	6,32	7,12	7,28	3,37	3,8	7,29
Статистичні характеристики			13,22		5,253 2,1-7,29		4,3685		2,0901		
<u>За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=10,7 > \chi^2_{0,05;2} = 5,9$</u>											

Продовження табл. 2.13

Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка											
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796				
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6				
$V_{MEX,i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03				
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,07	3,5	6,86	3,41	4,64	3,75				
Статистичні характеристики			$\bar{V}_{MEX}$ За загл.		$\bar{T}_p, \kappa H \cdot m$		D_T		σ_T		R_T
			12,87		4,705 3,41-6,86		2,1105		1,4528		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=3,9 < \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Тринадцятий геологічний інтервал 796-800 м, друга лінійна ділянка											
Глибина, м	796	797	798	799	800						
H_B , м	0	1	2	3	4						
$V_{MEX,i}$, м/год		6,08	9,22	11,50	9,79						
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	7,7	8,81	5,57	4,23						
Статистичні характеристики			8,65		6,5775 4,23-8,81		4,2566		2,0632		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=4$ $\chi^2=3,8 < \chi^2_{0,03;2} = 4,7$ ймовірність 0,97											
Чотирнадцятий геологічний інтервал 871-880 м											
Глибина, м	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,25	4,96	4,26	4,41	4,02	4,26	7,73	9,05	10,25	
W_{II}	-	3,01	2,44	4,13	3,65	8,59	4,99	3,29	4,56	4,88	
Статистичні характеристики			5,61		4,3933 2,44-8,59		3,3933		1,7959		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
П'ятнадцятий геологічний інтервал 920-930 м											
Глибина, м	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,81	8,19	10,04	10,68	11,90	10,76	10,41	12,30	13,06	10,46
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	6,31	8,74	9,62	11,68	3,56	8,84	6,45	5,31	3,93	4,59
Статистичні характеристики			10,46		6,903 3,56-11,68		7,3097		2,7036		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=3,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Шістнадцятий геологічний інтервал 941-950 м											
Глибина, м	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$V_{MEX,i}$, м/год	-	16,80	12,51	8,46	9,90	9,54	8,64	12,41	7,64	9,35	
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	-	4,71	4,4	6,04	2,9	5,5	3,72	4,16	8,89	
Статистичні характеристики			10,07		5,04 2,9-8,89		3,3784		1,8381		
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,4 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Продовження табл. 2.13

Сімнадцятий геологічний інтервал 950-960 м											
Глибина, м	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960
H_b , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	11,86	16,02	10,44	14,71	18,06	8,90	14,91	10,63	16,61	17,80
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	10,1	3,73	4,14	4,3	4,92	4,45	6,9	9,32	3,98	4,17
Статистичні характеристики			13,24		5,601 3,73-10,1		5,5057		2,3464		41,9
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=9,5 > \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Вісімнадцятий геологічний інтервал 1030-1040 м											
Глибина, м	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040
H_b , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	8,65	6,17	8,64	12,06	9,31	9,24	8,11	7,26	7,78	7,82
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	5,06	3,28	7,39	4,79	8,05	6,29	3,99	5,96	4,86	6,25
Статистичні характеристики			8,27		5,592 3,28-8,05		2,1893		1,4796		26,4
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=2,1 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
Дев'ятнадцятий геологічний інтервал 1230-1240 м											
Глибина, м	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240
H_b , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	7,94	9,80	10,13	7,86	6,69	12,52	15,21	11,29	9,80	12,54
$T_p, \kappa H \cdot m$	-	7,47	9,95	10,91	8,24	11,17	19,85	5,95	4,62	13,82	9,82
Статистичні характеристики			9,81		10,18 4,62-19,85		18,7076		4,3252		42,5
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5 \chi^2=0,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 2.14 – Статистичні характеристики вибірок обертового моменту ротора $T_{P,i}, \kappa H \cdot m$ за виділеними лінійними ділянками у порядку зростання середнього значення механічної швидкості вибірок в аналізованому інтервалі заглиблення свердловини

ЛД	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	D_T , $(\kappa H \cdot m)^2$	σ_T , $\kappa H \cdot m$	R_T , %
14ГІ – 871-880	9	6,35	4,39 2,44-8,59	3,3933	1,7959	40,1
18ГІ – 1030-1040	10	8,5	5,59 3,28-8,05	2,1893	1,4796	26,5
13ГІ.2 – 796-800	4	9,15	6,58 4,23-8,81	4,2566	2,0632	31,4
16ГІ – 942-950	8	9,81	5,04 2,9-8,89	3,3784	1,8381	36,5
10ГІ – 674-680	6	10,09	4,72 2,77-7,32	3,0319	1,7412	36,9
11ГІ – 680-690	10	10,27	6,19 2,92-7,26	2,0948	1,4473	23,4
19ГІ – 1230-1240	10	10,38	10,18 4,62-19,8	18,7076	4,3252	42,5
15ГІ – 920-930	10	10,66	6,90 3,56-11,68	7,3097	2,7036	39,2
7ГІ – 640-646	6	10,98	4,22 2,14-5,97	1,9635	1,4013	33,2
5ГІ – 620-631	11	11,26	4,98 2,31-6,84	1,9897	1,4106	28,3

Продовження табл. 2.14

ЛД	n	$\bar{V}'_{MEX}$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	$D_T,$ $(\kappa H \cdot m)^2$	$\sigma_T,$ $\kappa H \cdot m$	$R_T,$ %
9ГІ – 663-670	7	12,76	5,2 2,03-7,24	4,6311	2,152	
13ГІ.1 – 790-796	6	13,38	4,7 3,41-6,86	2,1105	1,4528	
12ГІ – 690-700	10	13,7	5,25 2,1-7,29	4,3685	2,0901	
2ГІ – 490-500	10	13,90	5,12 1,4-7,26	4,9048	2,2147	
17ГІ – 1030-1040	10	13,99	5,6 3,73-10,1	5,5057	2,3464	
1ГІ – 480-490	9	14,05	5,63 2,11-7,17	3,0839	1,7561	
6ГІ – 631-640	9	14,15	5,06 2,06-7,33	3,0601	1,7493	
8ГІ – 647-660	13	14,37	6,28 2,63-7,34	1,9342	1,3907	
4ГІ – 610-620	10	17,01	4,80 1,19-6,77	3,1046	1,1759	
3ГІ – 580-590	10	20,03	6,29 3,96-7,31	1,3644	1,1681	

Згідно методики визначення артефактів 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 тільки при $n \geq 10$. Якщо цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$ то визначення артефактів проводиться при будь-якому об'ємі вибірки. Артефакти знаходяться за межами інтервалу $(\bar{W}_n - \Delta; \bar{W}_n + \Delta)$. Величина Δ визначається за формулою $\Delta = t_{KP} \cdot \sigma_V \cdot \sqrt{\frac{n+1}{n}}$, де t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за прийнятим рівнем значущості α та числом ступенів вільності $\kappa = n - 1$; n – об'єм сукупності значень W_i .

Таблиця 2.15 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

(ЛД) $\bar{V}_{MEX} / n$	$\bar{W}_n,$ $H \cdot m / cm^3$	σ_W	t_{kp} і α	Δ	$\bar{W}_n - \Delta;$ $\bar{W}_n + \Delta$	$\bar{W}'_{n'},$ n'	(D'_W) (D_W)	σ'_W (σ_W)	$R_V,$ %
14ГІ; 6,35/9	4892	3307	1,86 $\alpha = 0,1$	6484	-1592-11376 Арт. відс.	(4892)	(10936249)	(3307)	67,6
18ГІ; 8,5/10	4378	1018	1,83 $\alpha = 0,1$	1954	2424-6332 Арт. відс.	(4378)	(1036324)	(1018)	23,2
13ГІ.2; 9,15/4	4509	2250	2,35 $\alpha = 0,1$	5912	-1403-10421 Арт. відс.	(4509)	(5062500)	(2250)	49,9
16ГІ; 9,81/8	3140	1223	1,89 $\alpha = 0,1$	2452	688-5592 Арт. відс.	(3140)	(1495729)	(1223)	38,9
10ГІ; 10,09/6	3112	1593	2,13 $\alpha = 0,1$	3665	-553-6777 Арт. відс.	(3112)	(2537649)	(1593)	51,2
11ГІ; 10,27/10	4481	1202	1,83 $\alpha = 0,1$	2307	2174-6788 Арт. відс.	(4481)	(1444804)	(1202)	26,8
19ГІ; 10,38/10	6667	2876	1,83 $\alpha = 0,1$	5520	1147-12187 Арт. відс.	(6667)	(8271376)	(2876)	43,1
15ГІ; 10,66/10	4126	1841	1,83 $\alpha = 0,1$	3533	593-7659 Арт. відс.	(4126)	(3389281)	(1841)	44,6

Таблиця 2.15 – Визначення артефактів для вибірок значень механічної швидкості буріння і статистичні характеристики вибірок без артефактів

(ЛД) $\bar{V}_{MEX} / n$	$\bar{W}_\Pi$, Н·м/см ³	σ_W	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{W}_\Pi - \Delta$; $\bar{W}_\Pi + \Delta$	$\bar{W}'_{\Pi,};$ n'	(D'_W) (D_W)	σ'_W (σ_W)	R_V , %
7ГІ; 10,98/6	2356	380	2,13 $\alpha=0,1$	874	1482-3230 Арт. відс	(2356)	(144400)	(380)	3,4
5ГІ; 11,26/11	2263	638	1,81 $\alpha=0,1$	1206	1057-3469 Арт. 3556	2133; $n'=10$	248004	498	23,3
$\kappa=5 \chi^2=2,8 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$									
9ГІ; 12,76/7	2488	1262	1,94 $\alpha=0,1$	2617	-129-5105 Арт. відс	(2488)	(1592644)	(1262)	50,7
13ГІ.1; 13,38/6	2061	308	2,13 $\alpha=0,1$	709	1352-2770 Арт. відс	(2061)	(94864)	(308)	14,9
12ГІ; 13,7/10	2382	1233	1,83 $\alpha=0,1$	2366	16-4748 Арт. відс	(2382)	(1520289)	(1233)	51,8
2ГІ; 13,9/10	1994	993	1,83 $\alpha=0,1$	1906	88-3900 Арт. відс	(1994)	(986049)	(993)	49,8
17ГІ; 13,99/10	2577	1438	1,83 $\alpha=0,1$	2760	-183-5337 Арт. відс	(2577)	(2067844)	(1438)	55,8
1ГІ; 14,05/9	1970	784	1,86 $\alpha=0,1$	1537	433-3507 Арт. відс	(1970)	(614656)	(784)	39,8
6ГІ; 14,15/9	2190	665	1,86 $\alpha=0,1$	1304	886-3494 Арт. відс	(2190)	(442225)	(665)	30,4
8ГІ; 14,37/13	2674	796	1,78 $\alpha=0,1$	1470	1204-4144 Арт. відс	(2674)	(633616)	(796)	29,8
4ГІ; 17,01/10	1756	737	1,83 $\alpha=0,1$	1414	342-3170 Арт. 308	1917; $n'=9$	248004	566	29,5
$\kappa=5 \chi^2=1,5 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$									
3ГІ; 20,03/10	2156	724	1,83 $\alpha=0,1$	1390	766-3546 Арт. відс	(2156)	(524176)	(724)	33,6

При визначенні артефактів у вибірках дискретних значень обертового моменту керуватись положеннями методики згідно якої 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 тільки при $n \geq 10$. Якщо цей коефіцієнт R знаходиться в діапазоні $20\% \leq R \leq 30\%$ то визначення артефактів проводиться при будь-якій кількості вибірок.

Таблиця 2.16 – Визначення артефактів для вибірок значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

(ЛД) $\bar{V}_{MEX} / n$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	σ_T	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{T}_P - \Delta$; $\bar{T}_P + \Delta$	$\bar{T}'_P$, $\kappa H \cdot m$	σ'_T	R_T , %
14ГІ; 6,35/9	4,39 2,44-8,59	1,7959	1,86 $\alpha=0,1$	3,52	0,87-7,91 Арт. 8,59	3,87 2,44-4,99	0,9249	23,9
18ГІ; 8,5/10	5,59 3,28-8,05	1,4796	1,83 $\alpha=0,1$	2,84	2,75-8,43 Арт. відс	(5,59) 3,28-8,05	1,4796	26,5
13ГІ.2; 9,15/4	6,58 4,23-8,81	2,0632	2,35 $\alpha=0,1$	5,42	1,16-12 Арт. відс	(6,58) 4,23-8,81	2,0632	31,4
16ГІ; 9,81/8	5,04 2,9-8,89	1,8381	1,89 $\alpha=0,1$	3,68	1,36-8,72 Арт. 8,89	4,49 2,9-6,04	1,0574	23,6
10ГІ; 10,09/6	4,72 2,77-7,32	1,7412	2,13 $\alpha=0,1$	4,00	0,72-8,72 Арт. відс	(4,72) 2,77-7,32	1,7412	36,9
11ГІ; 10,27/10	6,19 2,92-7,26	1,4473	1,83 $\alpha=0,1$	2,78	3,41-8,97 Арт. 2,92	6,6 4,77-7,26	0,8212	12,4

Продовження табл. 2.16

(ЛД) $\bar{V}_{MEX} / n$	$\bar{T}_P, \kappa H \cdot m$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	σ_T	$t_{кр}$ $i \alpha$	Δ	$\bar{T}_P - \Delta;$ $\bar{T}_P + \Delta$	$\bar{T}'_P,$ $\kappa H \cdot m$	σ'_T	$R_T,$ %
19Г; 10,38/10	10,18 4,62-19,85	4,3252	1,83 $\alpha=0,1$	8,30	1,88-18,48 Арт. 19,85	9,10 4,62-13,82	2,8388	31,2
15Г; 10,66/10	6,90 3,56-11,68	2,7036	1,83 $\alpha=0,1$	5,19	1,71-12,09 Арт. відс.	(6,90) 3,56-11,68	(2,7036)	39,2
7Г; 10,98/6	4,22 2,14-5,97	1,4013	2,13 $\alpha=0,1$	3,22	1-7,44 Арт. відс.	(4,22) 2,14-5,97	(1,4013)	33,2
5Г; 11,26/11	4,98 2,31-6,84	1,4106	1,81 $\alpha=0,1$	2,67	2,31-7,65 Арт. відс.	(4,98) 2,31-6,84	(1,4106)	28,3
9Г; 12,76/7	5,2 2,03-7,24	2,152	1,94 $\alpha=0,1$	2,30	2,9-7,5 Арт. 2,03	5,74 2,9-7,24	1,7894	31,2
13Г.1; 13,38/6	4,7 3,41-6,86	1,4528	2,13 $\alpha=0,1$	3,34	1,36-8,04 Арт. відс.	(4,7) 3,41-6,86	(1,4528)	30,9
12Г; 13,7/10	5,25 2,1-7,29	2,0901	1,83 $\alpha=0,1$	4,01	1,24-9,26 Арт. відс.	(5,25) 2,1-7,29	(2,0901)	33,4
2Г; 13,9/10	5,12 1,4-7,26	2,2147	1,83 $\alpha=0,1$	4,25	0,87-9,37 Арт. відс.	(5,12) 1,4-7,26	(2,2147)	43,2
17Г; 13,99/10	5,6 3,73-10,1	2,3464	1,83 $\alpha=0,1$	4,5	1,1-10,1 Арт. відс.	(5,6) 3,73-10,1	(2,3464)	41,9
1Г; 14,05/9	5,63 2,11-7,17	1,7561	1,86 $\alpha=0,1$	3,44	2,19-9,07 Арт. 2,11	6,07 3,74-7,17	1,2372	20,4
6Г; 14,15/9	5,06 2,06-7,33	1,7493	1,86 $\alpha=0,1$	3,43	1,63-8,49 Арт. відс.	(5,06) 2,06-7,33	(1,7493)	34,6
8Г; 14,37/13	6,28 2,63-7,34	1,3907	1,78 $\alpha=0,1$	2,57	3,71-8,85 Арт. 2,63	6,57 4,74-7,34	0,8884	13,5
4Г; 17,01/10	4,80 1,19-6,77	1,1759	1,83 $\alpha=0,1$	2,26	2,54-7,06 Арт. 1,19	5,2 3,07-6,77	1,2991	25
3Г; 20,03/10	6,29 3,96-7,31	1,1681	1,83 $\alpha=0,1$	2,24	4,05-8,53 Арт. 3,96	6,55 4,94-7,31	0,8844	13,5

Прим: $\bar{T}'_P, \sigma'_T, n'$ – статистичні характеристики і об'єм вибірок обертового моменту без артефактів, виділені в таблиці жирним шрифтом. При відсутності артефактів

$$\bar{T}'_P \equiv \bar{T}_P, \sigma'_T \equiv \sigma_T, n' \equiv n$$

Третій етап "Методики аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінчених нафтових і газових свердловин. Приклад аналізу процесу зміни технологічних параметрів буріння закінченої свердловини Ужгородська 104 за геологічним журналом".

Перевірка параметричних нульових гіпотез про рівність вибірових дисперсій і середніх значень вибірок дискретних значень механічної швидкості, осьового навантаження на долото та частоти обертання долота для виділених лінійних ділянок в межах аналізованої величини поглиблення свердловини,

Перевірка параметричних нульових гіпотез проводиться тільки для вибірок дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння, для яких гіпотеза про нормальний закон розподілу цих значень не відхиляється. За табл.2.1 для всіх дискретних значень вибірок механічної швидкості гіпотеза про нормальний закон їх розподілу підтверджена.

В табл.2.5 проведена перевірка гіпотез для вибірок дискретних значень механічної швидкості буріння. Для більш зручного користування результатами перевірки гіпотез представляємо їх в вигляді табл.3.1, за взірць взята табл.2.8.

Таблиця 3.1 – Перевірка нульових гіпотез: $D_{V,j} = D_{V,k}$ та альтернативної $D_{V,j} \neq D_{V,k}$, $\alpha=0,01$ і

$\bar{V}_{MEX,j} = \bar{V}_{MEX,k}$ та альтернативної - $\bar{V}_{MEX,j} \neq \bar{V}_{MEX,k}$, $\alpha=0,05$

№ виб.	$\bar{V}_{MEX},$ $m / год$	$D_V,$ $(m / год)^2$	n	$F_{сп} < F_{кр}$	Нульова гіпотеза $D_{V.j} = D_{V.k}$	Перевірка умови $T_{сп} < T_{кр}$	Нульова гіпотеза $\bar{V}_{MEX.j} = \bar{V}_{MEX.k}$
14ГІ	6,35	5,9844	9	2,45<5,47	Підтверджена	2,31>2,11	Не підтверджена
18ГІ	8,5	2,4465	10				
Вибірка 14ГІ належить до першої ГС							
18ГІ	8,5	2,4465	10	2,09<6,99	Підтверджена	0,6<2,18	Підтверджена
13ГІ.2	9,15	5,1206	4				
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,3<5,62	Підтверджена	1,66<2,18	Підтверджена
16ГІ	9,81	3,1775	8				
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,65<6,06	Підтверджена	1,19<2,14	Підтверджена
10ГІ	10,09	4,0399	6				
18ГІ	8,5	2,4465	10	3,2<5,47	Підтверджена	1,73<2,11	Підтверджена
11ГІ	10,27	7,8242	9				
18ГІ	8,5	2,4465	10	2,73<5,35	Підтверджена	1,97<2,1	Підтверджена
19ГІ	10,38	6,6731	10				
18ГІ	8,5	2,4465	10	1,1<5,35	Підтверджена	3,16>2,1	Не підтверджена
15ГІ	10,66	2,2231	10				
До другої ГС однорідних лінійних ділянок, за вище наведеним матеріалом, можна віднести, в порядку зростання механічної швидкості, вибірки 18ГІ , 13ГІ.2, 16ГІ, 10ГІ, 11ГІ, 19ГІ.							
15ГІ	10,66	2,2231	10	9,24>5,06	Не підтверджена	Не перевірялась	
7ГІ	10,98	20,5547	6				
15ГІ	10,66	2,2231	10	1,24<5,26	Підтверджена	0,87<2,09	Підтверджена
5ГІ	11,26	2,7456	11				
15ГІ	10,66	2,2231	10	4,42<5,8	Підтверджена	1,86<2,13	Підтверджена
9ГІ	12,76	9,8265	7				
15ГІ	10,66	2,2231	10	3,88<6,06	Підтверджена	2,48>2,14	Не підтверджена
13ГІ.1	13,38	8,6165	6				
До третьої ГС однорідних лінійних ділянок, за вище наведеним матеріалом, можна віднести, в порядку зростання механічної швидкості, вибірки 15ГІ , 5ГІ, 9ГІ.							
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,12<6,06	Підтверджена	0,22<2,14	Підтверджена
12ГІ	13,7	7,7228	10				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,02<10,15	Підтверджена	0,34<2,14	Підтверджена
2ГІ	13,90	8,7721	10				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,26<10,15	Підтверджена	0,37<2,14	Підтверджена
17ГІ	13,99	10,8631	10				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,3<7,46	Підтверджена	0,47<2,14	Підтверджена
1ГІ	14,05	6,6406	9				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,41<10,27	Підтверджена	0,44<2,16	Підтверджена
6ГІ	14,15	12,1181	9				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,49<9,89	Підтверджена	1,57<2,11	Підтверджена
8ГІ	14,37	12,8587	13				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	1,79<10,15	Підтверджена	1,95<2,14	Підтверджена
4ГІ	17,01	15,4536	10				
13ГІ.1	13,38	8,6165	6	3,32<10,15	Підтверджена	2,78<2,14	Не підтверджена
3ГІ	20,03	28,5811	10				
До четвертої ГС однорідних лінійних ділянок, за вище наведеним матеріалом, можна віднести, в порядку зростання механічної швидкості, вибірки 13ГІ.1 , 12ГІ, 2ГІ, 17ГІ, 1ГІ, 6ГІ, 8ГІ, 4ГІ.							
До п'ятої ГС відноситься вибірка 3ГІ							

Остаточний висновок про належність відповідних вибірок до другої, третьої і четвертої ГС треба зробити тільки після перевірки параметричних нульових гіпотез для вибірок дискретних значень вибірок параметрів режиму буріння, які орієнтовно віднесені до відповідних ГС, а закон розподілу цих значень відповідає нормальному закону.

До другої ГС віднесені вибірки 18ГІ, 13ГІ.2, 16ГІ, 10ГІ, 11ГІ, 19ГІ. За перевіркою закону розподілу дискретних значень частоти обертання, які відносяться до цих вибірок, табл.2.6, гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки **10ГІ** відхилена.

До третьої ГС віднесені вибірки 15ГІ, 5ГІ, 9ГІ. За перевіркою закону розподілу дискретних значень частоти обертання, які відносяться до цих вибірок, табл.2.6, гіпотеза про нормальний закон розподілу значень вибірки **5ГІ** відхилена.

До четвертої ГС віднесені вибірки 13ГІ.1, 12ГІ, 2ГІ, 17ГІ, 1ГІ, 6ГІ, 8ГІ, 4ГІ. За перевіркою закону розподілу дискретних значень частоти обертання, які відносяться до цих вибірок, табл.2.6, гіпотези про нормальний закон розподілу значень вибірок **12ГІ, 2ГІ, 6ГІ, 8ГІ і 3ГІ** відхилені.

За результатами перевірки параметричних нульових гіпотез для вибірок 18ГІ, 13ГІ.2, 16ГІ, 11ГІ, 19ГІ дискретних значень частоти обертання виділяються нові ГС: ГС2-18ГІ, ГС2.1-13ГІ.2, ГС2.2-16ГІ, ГС2.3-11ГІ, ГС2.4-19ГІ, ГС2.5-10ГІ. Для вибірок 15ГІ, 5ГІ, 9ГІ виділені нові ГС: ГС3-15ГІ, ГС3.1-5ГІ, ГС3.2-9ГІ. Для вибірок 13ГІ.1, 12ГІ, 2ГІ, 17ГІ, 1ГІ, 6ГІ, 8ГІ, 4ГІ виділені нові ГС: ГС.4-13ГІ.1, 17ГІ і 4ГІ; ГС.4.1-12ГІ, ГС.4.2-2ГІ, ГС.4.3-1ГІ, ГС.4.4-6ГІ, ГС.4.5-8ГІ. Для ГС.4 проводиться перевірка параметричних нульових гіпотез для вибірок 13ГІ.1, 17ГІ і 4ГІ дискретних значень осьового навантаження на долото. Результати перевірки наведені в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Перевірка нульових $D_{F,j} = D_{F,k}$, $\alpha = 0,01$; $\bar{F}_j = \bar{F}_k$, $\alpha = 0,05$ та альтернативних

$D_{F,j} \neq D_{F,k}$, $\alpha = 0,01$ $\bar{F}_j \neq \bar{F}_k$, $\alpha = 0,05$ гіпотез

№ виб	$F_{\text{ДОЛ}}, \text{мс}$	D_n , $(\text{хв}^{-1})^2$	N	$F_{\text{СП}} < F_{\text{КР}}$	Нульова гіпотеза $D_{F,x} = D_{F,y}$	Перевірка умови $T_{\text{СП}} < T_{\text{КР}}$	Нульова гіпотеза $\bar{n}_{F,x} = \bar{n}_{F,y}$
13ГІ.1	1,21	0,0582	6	1,3<6,06	Підтверджена	3,67>2,14	Не підтверджена
17ГІ	1,633	0,045	10				
13ГІ.1	1,21	0,0582	6	3,62<10,9	Підтверджена	0,74<2,14	Підтверджена
4ГІ	1,362	0,2106	10				

За результатами перевірки параметричних нульових гіпотез тільки дві однорідні лінійні ділянки, представлені вибілками 13ГІ.1 і 4ГІ. Дискретні значення відповідних параметрів об'єднаної вибірки наведено в табл.3.3 і 3.4.

Таблиця 3.3

Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка								Вибірка 4ГП			
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796	611	612	613	614
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{ME\dot{X}_i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03	14,13	15,55	13,55	14,00
Глибина, м	615	616	617	618	619	620					
n	-	56,79	59,07	56,54	60,85	57,04	54,25	55,01	56,28	53,24	51,97
$F_{ДОЛ},mc$	-	1,18	1,63	1,18	0,92	1,06	1,29	1,31	1,22	1,88	1,57
H_B , м	11	12	13	14	15	16					
$V_{ME\dot{X}_i}$, м/год	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31					
n	56,79	60,08	61,1	59,32	58,06	59,07					
$F_{ДОЛ},mc$	1,6	1,66	0,68	1,0	1,99	0,71					
$V_{ME\dot{X}_i}$			Відс.		15,65		15,441		3,9295		25,1
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=2,0 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
n			Відс.		57,22		7,1485		2,6737		4,7
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=1,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
$F_{ДОЛ},mc$			Відс.		1,305		0,1516		0,3893		29,8
За критерієм згоди Пірсона при $\kappa=5$ $\chi^2=0,7 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 3.4

Тринадцятий геологічний інтервал 790-796 м, перша лінійна ділянка								Вибірка 4ГІ			
Глибина, м	790	791	792	793	794	795	796	611	612	613	614
H_B , м	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_{MEX,i}$, м/год	-	16,73	13,75	17,00	10,30	11,48	11,03	14,13	15,55	13,55	14,00
Глибина, м	615	616	617	618	619	620	796	611	612	613	614
W_{II}	-	2122	1548	2349	2074	2374	1899	2546	1752	2739	2301
$T_P, кН \cdot м$	-	6,07	3,5	6,86	3,41	4,64	3,75	6,35	4,7	6,77	6,02
H_B , м	11	12	13	14	15	16					
$V_{MEX,i}$, м/год	16,24	12,34	24,30	18,87	21,84	19,31					
W_{II}	2233	1539	308	1729	1336	1080					
$T_P, кН \cdot м$	6,2	3,07	1,19	5,34	4,88	3,43					
W_{II}			Відс.		1871		381015		617		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=1,9 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											
$T_P, кН \cdot м$			Відс.		4,761 1,19...6,86		2,5683		1,6026		
За критерієм згоди Пірсона при $k=5 \chi^2=4,7 < \chi^2_{0,05;2} = 5,9$											

Таблиця 3.5 – Визначення артефактів для вибірок механічної швидкості, енергоємності і значень обертового моменту ротора і статистичні характеристики вибірок без артефактів

(ЛД)	$\bar{V}_{MEX};$ n	σ_V	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{V}_{MEX} - \Delta$ $\bar{V}_{MEX} + \Delta$	$\bar{V}'_{MEX};$ n'	D'_V (D_V)	σ'_V (σ_V)	R_V , %
ГС.4:13ГІ.1-4ГІ	15,65; 16	3,9225	1,75 $\alpha=0,1$	7,08	8,57...22,73 Арт. 24,3	15,07; 15	10,8448	3,2931	21,8
	$\bar{T}_P, кН \cdot м$ $T_{P.MIN} \dots T_{P.MAX}$	σ_T	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{T}_P - \Delta;$ $\bar{T}_P + \Delta$	$\bar{T}'_P,$ $кН \cdot м$	D'_T (D_T)	σ'_T (σ_T)	R_T , %
	4,761 1,19...6,86	1,6026	1,75 $\alpha=0,1$	2,89	1,87...7,65 Арт. 1,19	5,0 3,07...6,86	1,78	1,3343	26,7
	$\bar{W}_{II},$ $Н \cdot м/см^3$	σ_W	$t_{кр}$ і α	Δ	$\bar{W}_{II} - \Delta;$ $\bar{W}_{II} + \Delta$	$\bar{W}'_{II};$ n'	D'_W (D_W)	σ'_W (σ_W)	R_W , %
	1871	617	1,75 $\alpha=0,1$	1113	758...2984 Арт. 308	1975	221841	471	23,8

За наведеним вище матеріалом виділені такі ГС з відповідними вибілками: ГС: ГС2-18ГІ, ГС2.1-13ГІ.2, ГС2.2-16ГІ, ГС2.3-11ГІ, ГС2.4-19ГІ, ГС2.5-10ГІ. Для вибірок 15ГІ, 7ГІ, 5ГІ, 9ГІ виділені нові ГС: ГС3-15ГІ, ГС3.1-7ГІ, ГС3.2-5ГІ, ГС3.3-9ГІ. Для вибірок 12ГІ, 2ГІ, 17ГІ, 1ГІ, 6ГІ, 8ГІ, виділені нові ГС: ГС.4-12ГІ, ГС.4.1-2ГІ, ГС.4.2-17ГІ, ГС.4.3-1ГІ, ГС.4.4-6ГІ, ГС.4.5-8ГІ. Об'єднану вибірку 13ГІ.1-4ГІ віднесено до п'ятої ГС.

В табл.3.6 наведено середні арифметичні вибірок дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння в діапазоні заглиблення 480-1240 м закінченої свердловини Ужгородська 104 в порядку зростання середнього арифметичного механічної швидкості буріння, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Таблиця 3.6 – Однорідні лінійні ділянки, генеральні сукупності, за цими ділянками, і середні арифметичні вибірок дискретних значень технологічних параметрів процесу буріння в діапазоні заглиблення 480-1240 м закінченої свердловини Ужгородська 104 в порядку зростання середнього арифметичного механічної швидкості буріння, літологічні характеристики породи: глина сіра – 100%.

Позначення і інтервал лінійної ділянки, м	ГС	n	$\bar{V}_{MEH},$ $м / год$	$\bar{n}_d, хв^{-1}$	$\bar{F}_{ДОЛ},$ $мс$	$\bar{T}_P, кН \cdot м$ $T_{P.MIH} \dots T_{P.MAX}$	$\bar{W}_П,$ $Н \cdot м / см^3$
14ГІ – 871-880	1	9	6,35	58,34	1,48	3,87 2,44...4,99	4892
18ГІ – 1030-1040	2	10	8,5	64,17	2,0	5,59 3,28...8,05	4378
13ГІ.2 – 796-800	2.1	4	9,15	56,03	1,51	6,58 4,23...8,81	4509
16ГІ – 942-950	2.2	8	9,81	58,14	1,47	4,49 2,9...6,04	3140
10ГІ – 674-680	2.3	6	10,09	60,97	1,61	4,72 2,77...7,32	3112
11ГІ – 680-689	2.4	9	10,27	69,85	1,44	6,6 4,77...7,26	4481
19ГІ – 1230-1240	2.5	10	10,38	62,98	2,41	9,10 4,62...13,82	6667
15ГІ – 920-930	3	10	10,66	59,5	1,61	6,90 3,56...11,68	4126
7ГІ – 640-646	3.1	6	10,98	58,23	1,54	4,22 2,14...5,97	2356
5ГІ – 620-631	3.2	11	11,26	50,4	1,78	4,98 2,31...6,84	2263
9ГІ – 663-670	3.3	7	12,76	56,72	1,31	5,74 2,9...7,24	2488
12ГІ – 690-700	4	10	13,7	65,33	1,36	5,25 2,1...7,29	2382
2ГІ – 490-500	4.1	10	13,90	50,33	2,0	5,12 1,4...7,26	1994
17ГІ – 1030-1040	4.2	10	13,99	57,78	1,63	5,6 3,73...10,1	2577
1ГІ – 480-490	4.3	9	14,05	46,11	2,04	6,07 3,74...7,17	1970
6ГІ – 631-640	4.4	9	14,15	57,24	1,89	5,06 2,06...7,33	2190
8ГІ – 647-660	4.5	13	14,37	57,04	1,57	6,57 4,74...7,34	2674
13ГІ.1 – 790-796 4ГІ – 610-620	5	15	15,07	57,22	1,30	5,0 3,07...6,86	1975
3ГІ – 580-590	6	10	20,03	62,52	1,35	6,55 4,94...7,31	2156

Додаток Е

Визначення довірчих інтервалів для значень загальної енергії процесу зміни крутного моменту на долоті, обчислених за емпіричними рівняннями регресії Методика визначення довірчих інтервалів

Під час аналізу частинних залежностей важливо одержати підтвердження того, що різниця між значеннями залежної фізичної величини, обчисленої за цими залежностями, виникає тільки внаслідок зміни зовнішнього незалежного чинника, а не в результаті похибок, допущених під час обробки даних експерименту. Розрізняють три види похибок: промах (артефакт), систематичну та випадкову. При проведенні планового експерименту результати дослідів одержані тільки для однієї комбінації зовнішніх незалежних чинників без проведення повторних паралельних дослідів. При таких експериментальних дослідженнях виділити промах і системну похибку, яка обумовлена дією сталих у часі інших зовнішніх незалежних факторів, вплив яких не досліджується в процесі експерименту, неможливо. Випадкова похибка обумовлена дією неконтрольованого впливу випадкових факторів на величину зовнішніх незалежних чинників (наприклад експериментатор допустив нестабільність осьового навантаження під час проведення досліджень, внаслідок збою в роботі привода долота неконтрольовано змінювалась частота обертання долота і т.д.). За цим при проведенні експерименту для одного варіанту комбінації вхідних зовнішніх незалежних чинників всі три види похибок будуть представлені тільки однією – випадковою. Врахувати вплив випадкової похибки на результати експерименту можна тільки за допомогою методів математичної статистики, які передбачають наявність вибірки значень фізичної величини.

Істинне значення величини x на практиці застосувати неможливо, так як його не можна визначити. Для практичних розрахунків замість значення X_{icm} приймають середнє значення $\bar{X}$ вибірки значень величини X а за дійсні значення, значення вибірки.

Для залежностей планового експерименту пропонується утворити таку вибірку з трьох значень: експериментального, обчисленого за формулою емпіричної залежності і за середнім для двох вище названих значень.

Враховуючи сказане вище і використовуючи літературні джерела [3,4] запропоновано методику визначення випадкової похибки для результатів планового експерименту, яка складається з таких етапів:

1. За двома значеннями фізичної величини, в даному випадку це загальна енергія динамічної складової процесу зміни обертового моменту на долоті, одне з них експериментальне значення $E_{T.E.i}$, усереднене за методикою обробки результатів планового експерименту, друге – значення $E_{T.f.i}$, обчислене за рівнянням емпіричної частинної залежності, визначаємо віртуальне значення за

формулою $E_{T.B} = \frac{E_{T.E} + E_{T.f}}{2}$;

2. Для вибірки з трьох значень $E_{T.E.i}$, $E_{T.f.i}$ і $E_{T.B.i}$ визначаємо середнє значення $\bar{E}_T = \frac{\sum_{i=1}^3 E_{T.i}}{3}$;

3. Визначаємо величину випадкової похибки для кожного значення вибірки за формулою:
 $\Delta E_{BП.i} = \bar{E}_T - E_{T.i}$;

4. Визначаємо суму $\sum \Delta E_{BП.i}^2$;

5. Визначаємо виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення оцінки середнього значення вибірки (помилка визначення середнього значення) – $\sigma_B = \sqrt{D_B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta E_{BП.i}^2}{3(3-1)}}$.

6. Визначення випадкової похибки залежно від прийнятої ймовірності P і об'єму вибірки n . При об'ємах вибірок $n < 30$ випадкова похибка визначається за формулою $BП = t_{P,m} \sigma_B$ [3].

Величина $t_{p,m}$ – коефіцієнт закону розподілу випадкових похибок Стюдента, який вибирається залежно від вибраної надійної ймовірності P і величини $m=n-1$. Об'єм вибірок, за яким визначається величина коефіцієнту $t_{p,m}$, для всіх результатів аналізу планового експерименту дослідження процесу зміни обертового моменту на долоті є постійним і рівний трьом. За цим прийняте значення $t_{p,m}$ залежить тільки від прийнятої довірчої ймовірності. Значення P , згідно рекомендацій [5], приймають при дослідженнях процесу буріння нафтових і газових свердловин з наступного ряду: 0,8; 0,9; 0,95. При попередніх випробуваннях бурової техніки, до яких можна віднести дослідження за плановим експериментом, довірчу ймовірність рекомендується приймати 0,8 [5]. Таблиця зі значеннями коефіцієнту $t_{p,m}$ залежно від прийнятої довірчої ймовірності

Довірча ймовірність P	0,7	0,8	0,9	0,95
Коефіцієнт $t_{p,m}$	1,34	1,89	2,92	4,3

7. Визначення відносної похибки за формулою $\delta E = \frac{BP}{\bar{E}_T} \cdot 100\%$. Визначення довірчого інтервалу істинного значення загальної енергії $E_{T,f,i}$ для i -того рівня зовнішнього незалежного чинника при вибраній, за п.6, прийнятої ймовірності – $E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$, де $\Delta E_{f,i} = \frac{E_{E,f} \cdot \delta E}{100}$.

Таблиця Е.1 – Значення BP_i для частинних залежностей $E_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 1440 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{T,i}$	216,04	335,28	463,9	659,48
$E_{T,f} = 106,69284 \cdot 1,076218^F$	222,40	321,1	463,6	669,33
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	219,22	328,19	463,75	664,405
$\Delta E_{BP,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	3,18; 3,18 ; 0	7,09 ; 7,09; 0	0,15; 0,15 ; 0	4,925 ; 4,925; 0
$\sum \Delta E_{BP,i}^2$	20,2248	100,5362	0,045	48,5112
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta E_{BP,i}^2}{3(3-1)}}$	1,8360	4,0934	0,0866	2,8434
$BP_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{p,m} = 1,89$	3,470	7,7365	0,1637	5,3741
$\delta E = \frac{BP}{\bar{E}_T} \cdot 100\%$	1,58%	2,36%	0,035%	0,81%
$\Delta E_{f,i} = \frac{E_{T,f,i} \cdot \delta E}{100}$	3,514	7,578	0,162	5,422
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$; $p = 0,8$	222,40±3,514 (218,89-225,91)	321,1±7,578 (328,68-313,52)	463,6±0,162 (463,76-463,44)	669,33±5,422 (674,75-663,91)
$BP_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{p,m} = 2,92$	5,3610	11,9528	0,2529	8,3029
δE ; $p = 0,9$	2,44%	3,64%	0,055%	1,25%
$\Delta E_{f,i}$	5,4388	11,6945	0,2528	8,3644
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$; $p = 0,9$	222,40±5,4388 (216,96-227,84)	321,1±11,6945 (309,4-332,79)	463,6±0,2528 (463,35-463,85)	669,33±8,3644 (660,96-677,69)

Таблиця Е.2 – Значення $B\Pi_i$ для частинних залежностей $E_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 2050 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{T,i}$	172,5	290,25	344,5	541
$E_{T,f} = n / 0,003401 \cdot n - 0,05683$	181,11	259,61	372,12	533,4
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	176,805	274,93	358,31	537,2
$\Delta E_{B\Pi,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	4,305; 4,305 ; 0	15,32 ; 15,32; 0	13,81; 13,81 ; 0	3,8 ; 3,8; 0
$\sum \Delta E_{B\Pi,i}^2$	37,0660	469,4048	381,4322	28,88
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 \Delta E_{B\Pi,i}^2}{3(3-1)}}$	2,4855	8,8450	7,9732	2,1939
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 1,89$	4,6976	16,7171	15,0693	4,1465
$\delta E = \frac{B\Pi}{\bar{E}_T} \cdot 100\%$	2,66%	6,08%	4,2%	0,77%
$\Delta E_{f,i} = \frac{E_{T,f,i} \cdot \delta E}{100}$	6,364	15,786	15,6290	4,1171
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	181,11±6,364 (174,75-187,47)	259,61±7,578 (275,40-243,82)	372,12±15,629 (376,33-367,91)	533,4±4,1171 (529,28-537,75)
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 2,92$	7,2576	25,8274	23,2818	6,4062
$\delta E; p = 0,9$	4,10%	9,39%	6,5%	1,19%
$\Delta E_{f,i}$	7,4344	24,3882	24,1791	6,3609
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}; p = 0,9$	181,11±7,4344 (173,68-188,54)	259,61±24,3882 (235,22-284,0)	372,12±24,1791 (347,94-396,30)	533,4±6,3609 (527,04-539,76)

Таблиця Е.3 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{T,f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 1440 МПа

n_{∂} , хв ⁻¹	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{T,i}$	444,16	421,37	411,54	397,61
$E_{T,f} = 651,0205 \cdot n^{-0,08764}$	442,45	424,09	411,42	396,69
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	443,30	422,73	411,48	397,15
$\Delta E_{B\Pi,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	0,855 ; 0,855; 0	1,36; 1,36 ; 0	0,06; 0,06 ; 0	0,46 ; 0,46; 0
$\sum \Delta E_{B\Pi,i}^2$	1,46205	3,6992	0,00072	0,4232
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,4936	0,7852	0,0346	0,2656
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 1,89$	0,9329	1,4840	0,0654	0,5019
$\delta E; p = 0,8$	0,21%	0,35%	0,016%	0,13%
$\Delta E_{f,i}$	0,931	1,489	0,066	0,516
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	442,45±0,931 (443,38-441,52)	424,09±1,489 (425,58-422,60)	411,42±0,066 (411,49-411,35)	396,69±0,5157 (397,21-396,17)
$B\Pi_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 2,92$	1,4413	2,2928	0,1010	0,7755
$\delta E; p = 0,9$	0,32%	0,54%	0,0246%	0,20%
$\Delta E_{f,i}$	1,4385	2,3002	0,1010	0,7934
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	442,45±1,4385 (443,89-441,01)	424,09±2,3002 (426,39-421,79)	411,42±0,1010 (411,52-411,32)	396,69±0,7934 (397,48-395,90)

Таблиця Е.4 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{T.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

$n_{\theta}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{T.i}$	384,75	332,25	316,5	314,75
$E_{T.f} = n / 0,003401 \cdot n - 0,05683$	369,28	336,28	322,71	312,34
$\bar{E}_T \equiv E_{T.B.i}$	377,02	334,265	319,605	313,545
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_T - E_{T.i};$	$\left \begin{smallmatrix} 7,73 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 7,74;$	$\left \begin{smallmatrix} 2,015 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 2,015 ;$	$\left \begin{smallmatrix} 3,105 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 3,105 ;$	$\left \begin{smallmatrix} 1,205 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 1,205;$
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	119,66045	8,12045	19,28205	2,90405
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	4,4658	1,1634	1,7927	0,6957
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	8,4404	2,1988	3,3882	1,3149
$\delta E; p = 0,8$	2,24%	0,65%	1,05%	0,42%
$\Delta E_{f.i}; p = 0,8$	8,267	2,186	3,388	1,312
$E_{T.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	369,28±8,267 (377,55-361,01)	336,28±2,186 (338,47-334,09)	322,71±3,388 (326,1-319,32)	312,34±1,312 (313,65-311,03)
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	13,0401	3,3970	5,2346	2,0315
$\delta E; p = 0,9$	3,46%	1,016%	1,64%	0,65%
$\Delta E_{f.i}$	12,7726	3,4175	5,2855	2,0237
$E_{T.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	369,28±12,7726 (382,05-356,51)	336,28±2,186 (339,7-332,86)	322,71±5,2855 (328-317,42)	312,34±1,312 (314,36-310,32)

Таблиця Е.5 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{T.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

$\beta, \text{кН}\cdot\text{с/м}$	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{T.i}$	466,55	440,79	387,32	380,02
$E_{T.f} = -1,04212 \cdot \beta + 470,8029$	470,70	429,12	397,75	377,01
$\bar{E}_T \equiv E_{T.B.i}$	468,625	434,955	392,535	378,515
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_T - E_{T.i};$	$\left \begin{smallmatrix} 2,075 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 2,075;$	$\left \begin{smallmatrix} 5,835 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 5,835 ;$	$\left \begin{smallmatrix} 5,215 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 5,215;$	$\left \begin{smallmatrix} 1,505 \\ 0 \end{smallmatrix} \right ; 1,505 ;$
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	8,61125	68,09445	54,39245	4,53005
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	1,1980	3,3688	3,0109	0,8689
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	2,2642	6,3671	5,6906	1,6422
$\delta E = \frac{B\Pi}{\bar{E}_T} \cdot 100\%$	0,48%	1,46%	1,45%	0,43%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{T.f.i} \cdot \delta E}{100}.$	2,2742	6,2817	5,7662	1,6357
$E_{T.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	470,7±2,2742 (472,97-468,42)	429,12±6,2817 (435,40-422,84)	397,75±5,7662 (403,52-391,98)	377,01±1,6357 (378,63-375,39)
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	3,4982	9,8370	8,7918	2,5372
$\delta E; p = 0,9$	0,75%	2,26%	2,24%	0,67%
$\Delta E_{f.i}$	3,5136	9,7050	8,9086	2,5271
$E_{T.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	470,7±3,5136 (474,21-467,19)	429,12±9,7050 (438,82-419,41)	397,75±8,9086 (406,66-388,84)	377,01±2,5271 (379,54-374,48)

Таблиця Е.6 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{T,f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 2050 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{T,i}$	372,75	337	324	314,5
$E_{T,f} = 375,2453 - 6,2354 \cdot \sqrt{\beta}$	373,27	335,81	323,08	316,09
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	373,01	336,405	323,54	315,295
$\Delta E_{ВП,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	0,26; 0,26 ; 0	0,595; 0,595 ; 0	0,46; 0,46 ; 0	0,795; 0,795 ; 0
$\sum \Delta E_{ВП,i}^2$	0,1352	0,70805	0,433	1,26405
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,1501	0,3435	0,2656	0,4590
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 1,89$	0,2837	0,6492	0,5019	0,8675
$\delta E; p = 0,8$	0,076%	0,19%	0,16%	0,28%
$\Delta E_{f,i} = \frac{E_{T,f,i} \cdot \delta E}{100}$	0,2839	0,6481	0,5012	0,8697
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	373,27±0,2839 (373,29-372,73)	335,81±0,6481 (336,46-335,16)	323,08±0,5012 (323,58-322,58)	316,09±0,8697 (316,96-315,22)
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 2,92$	0,4383	1,0031	0,7755	1,3403
$\delta E; p = 0,9$	0,118%	0,3%	0,24%	0,425%
$\Delta E_{f,i}; p = 0,9$	0,4386	1,0013	0,7744	1,3437
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	373,27±0,4386 (373,71-372,83)	335,81±1,0013 (336,81-334,81)	323,08±0,7744 (323,85-322,30)	316,09±1,3437 (317,43-314,75)

Таблиця Е.7 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{T,f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 1440 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $E_{T,i}$	419,41	427,85	456,96	370,47
$E_{T,f} = 361,1582748 + 0,1475957 \cdot C - 0,000057 \cdot C^2$	411,08	442,75	447,76	373,9
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	415,245	435,3	452,36	372,185
$\Delta E_{ВП,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	4,165 ; 4,165; 0	7,45; 7,45 ; 0	4,6 ; 4,6; 0	1,715; 1,715 ; 0
$\sum \Delta E_{ВП,i}^2$	34,69445	111,005	42,32	5,8824
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	2,4047	4,3012	2,6558	0,9902
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 1,89$	4,5448	8,1294	5,0195	1,8714
$\delta E; p = 0,8$	1,09%	1,87%	1,11%	0,50%
$\Delta E_{f,i}; p = 0,8$	4,54	8,2685	4,9684	1,8695
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	411,08±4,54 (406,54-415,62)	442,75±8,2685 (434,48-451,02)	447,76±4,9684 444,79-452,73	373,9±1,8695 375,78-372,03
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 2,92$	7,0216	12,5597	7,7549	2,8914
$\delta E; p = 0,9$	1,69%	2,88%	1,71%	0,78%
$\Delta E_{f,i}$	6,9512	12,7746	7,6761	2,9047
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}; p = 0,9$	411,08±4,54 404,13-418,03	442,75±12,7746 429,98-455,52	447,76±7,6761 440,08-455,44	373,9±2,9047 376,80-371

За рівнянням частинної залежності $E_{T,f} = f(C)$ локальний максимум зафіксований для жорсткості $0 = 0,1475957 - 2 \cdot 0,000057 \cdot C \rightarrow C = 1295 \text{ кН / м}$. $E_{T,max} = 456,70 \text{ Н} \cdot \text{м}$

90% довірчий інтервал для значення 456,7 визначаємо методом лінійної інтерполяції. При $C = 800 - \Delta E_{f,i} = 12,7746$; при $C = 1700 - \Delta E_{f,i} = 7,6761$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta E_f = 12,7746 - 7,6761 = 5,0985$. За цим на $1\text{кН} / \text{м}$ $\Delta E'_f = 5,0985 / 900 = 0,005665$. За різницею $1295 - 800 = 495$ одержимо $\Delta E_{f,800} - \Delta E'_f \cdot 495 = 12,7746 - 0,005665 \cdot 495 = 9,9704$.

За наведеним вище 90% довірчий інтервал локального максимуму рівний – 446,73-466,67. Значення жорсткості, які відповідають границям 90% довірчого інтервалу визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $\Delta C = 1295 - 800 = 495 - F_{f,1295-800} = 456,7 - 442,75 = 13,95$. За цим на $1\text{кН} / \text{м}$ $\Delta E'_f = 13,95 / 495 = 0,02818$. За різницею $13,95 - 9,9704 = 3,9796$ одержимо відповідну \ величину жорсткості $\Delta C = 3,9796 / 0,02818 = 141,2 \approx 141\text{кН} / \text{м}$.

За цим 90% довірчому інтервалу локального максимуму 446,73-466,67 відповідають такі значення жорсткості: $446,73 \rightarrow 1295 - 141 = 1154$ і $466,67 \rightarrow 1295 + 141 = 1436$ кН/м.

Таблиця Е.8 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{T,f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T,f,i}$, твердість породи 2050 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $E_{T,i}$	311	325,25	371,5	340,5
$E_{T,f} = 263,1212914 + 0,1189463 \cdot C - 0,0000348 \cdot C^2$	305,13	336,01	364,76	342,99
$\bar{E}_T \equiv E_{T,B,i}$	308,065	330,63	368,13	341,745
$\Delta E_{ВП,i} = \bar{E}_T - E_{T,i}$	$ 2,935 $; 2,935; 0	5,38; $ 5,38 $; 0	$ 3,37 $; 3,37; 0	1,245; $ 1,245 $; 0
$\sum \Delta E_{ВП,i}^2$	17,22845	57,8888	22,7138	3,100
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	1,6945	3,1061	1,9457	0,7188
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 1,89$	3,2026	5,8706	3,6773	1,3585
δE ; $p = 0,8$	1,04%	1,78%	1,0%	0,4%
$\Delta E_{f,i}$; $p = 0,8$	3,1721	5,966	3,65	1,37
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$	305,13 $\pm$ 3,1721 (301,96-308,3)	336,01 $\pm$ 5,966 (341,99-330,03)	364,76 $\pm$ 3,65 (368,41-361,11)	342,99 $\pm$ 1,37 (344,36-341,62)
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{p,m} = 2,92$	4,9480	9,0699	5,6814	2,0989
δE ; $p = 0,9$	1,606%	2,74%	1,54%	0,61%
$\Delta E_{f,i}$	4,9008	9,2175	5,6293	2,1065
$E_{T,f,i} \pm \Delta E_{f,i}$; $p = 0,9$	305,13 $\pm$ 4,9008 (300,23-310,03)	336,01 $\pm$ 9,2175 (326,79-345,23)	364,76 $\pm$ 5,6293 (359,13-370,39)	342,99 $\pm$ 2,1065 (354,09-340,88)

За рівнянням частинної залежності $E_{T,f} = f(C)$ локальний максимум зафіксований для жорсткості $0 = 0,1475957 - 2 \cdot 0,000057 \cdot C \rightarrow C = 1709\text{кН} / \text{м}$. $E_{T,max} = 364,76\text{Н} \cdot \text{м}$.

При $\Delta C = 1700 - 800 = 900 - F_{f,1295-800} = 364,76 - 336,01 = 28,75$. За цим на $1\text{кН} / \text{м}$ $\Delta E'_f = 28,75 / 900 = 0,03194$. За 90% довірчим інтервалом одержимо відповідну \ величину жорсткості $\Delta C = 5,6293 / 0,03194 = 176,2 \approx 176\text{кН} / \text{м}$.

За цим 90% довірчому інтервалу локального максимуму 359,13-370,39 відповідають такі значення жорсткості: $359,13 \rightarrow 1700 - 176 = 1524$ і $370,39 \rightarrow 1700 + 176 = 1876$ кН/м.

Таблиця Е.9 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{HЧК.f}$, твердість породи 1440 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	13,752	15,062	20,766	31,439
$E_{HЧК.f} = 1/(-0,00281927 \cdot F + 0,104105)$	13,173	16,177	20,956	29,741
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	13,4625	15,6195	20,861	30,59
$\Delta E_{HЧК.B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,2895 $; 0,2895; 0	0,5575; $ 0,5575 $; 0	0,095; $ 0,095 $; 0	$ 0,849 $; 0,849; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.B\Pi.i}^2$	0,1676	0,6216	0,01805	1,4416
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,1671	0,3219	0,0548	0,4902
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,3159	0,6083	0,1037	0,9264
$\delta E_{HЧК} = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{HЧК}} \cdot 100\%$	2,35%	3,89%	0,5%	3,03%
$\Delta E_{HЧК.f.i} = \frac{E_{HЧК.f.i} \cdot \delta E_{HЧК}}{100}$	1,513	0,630	0,104	0,901
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,8$	13,17±0,31 (13,48-12,86)	16,18±0,63 (16,81-15,55)	20,96±0,10 (21,06-20,86)	29,74±0,9 (30,64-28,84)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,48806	0,93986	0,1602	1,4314
$\delta E_{HЧК}, p = 0,9$	3,625%	6,017%	0,77%	4,81%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,47756	0,9734	0,1609	1,4314
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,9$	13,17±0,4776 (12,70-13,65)	16,18±0,9734 (15,20-17,15)	20,956±0,161 (20,80-21,12)	29,741±1,4314 (28,31-31,17)

Таблиця Е.10 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	7,765	8,222	15,444	26,806
$E_{HЧК.f} = 1/(-0,006626 \cdot F + 0,204074)$	7,256	9,552	13,975	26,025
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	7,5105	8,887	14,7095	26,4155
$\Delta E_{HЧК.B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,2545 $; 0,2545; 0	0,665; $ 0,665 $; 0	0,7345; $ 0,7345 $; 0	$ 0,3905 $; 0,3905; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.B\Pi.i}^2$	0,1295	0,88445	1,07898	0,30498
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,1469	0,3839	0,4241	0,22546
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,2777	0,7256	0,8015	0,4261
$\delta E_{HЧК} = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{HЧК}} \cdot 100\%$	3,70%	8,16%	5,45%	1,61%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,268	0,780	0,761	0,4198
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,8$	7,26±0,27 (7,53-6,99)	9,55±0,78 (10,33-8,77)	13,98±0,76 (14,74-13,22)	26,02±0,42 (26,44-25,6)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,42905	1,1211	1,2383	0,65833
$\delta E_{HЧК}, p = 0,9$	5,71%	12,625%	8,42%	2,49%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,4147	1,205	1,1764	0,6486
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,9$	7,256±0,4147 (6,84-7,67)	9,55±0,78 (8,35-10,76)	13,975±1,1764 (12,80-15,15)	26,025±0,6486 (25,38-26,67)

Таблиця Е.11 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

$n_{\partial}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	31,947	17,984	16,335	14,751
$E_{HЧК.f} = \frac{n}{0,0817874 \cdot n - 3,88259}$	29,037	19,013	16,357	14,670
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	30,492	18,4985	16,346	14,7105
$\Delta E_{HЧК.B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$\begin{vmatrix} 1,455 \\ 1,455; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,5145; \\ 0,5145; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,011; \\ 0,011; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,0405; \\ 0,0405; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta E_{HЧК.B\Pi.i}^2$	4,23405	0,5294	0,000242	0,00328
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,8400	0,2970	0,00635	0,02338
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	1,5877	0,5614	0,0120	0,0442
$\delta E_{HЧК} = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{HЧК}} \cdot 100\%$	5,21%	3,03%	0,073%	0,3%
$\Delta E_{HЧК.f.i} = \frac{E_{HЧК.f.i} \cdot \delta E_{HЧК}}{100}$	1,513	0,561	0,012	0,044
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	29,04 $\pm$ 1,51 (30,55-27,53)	19,01 $\pm$ 0,56 (19,57-18,45)	16,36 $\pm$ 0,012 (16,37-16,35)	14,67 $\pm$ 0,044 (14,71-14,67)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	2,4529	0,86736	0,018542	0,06828
$\delta E_{HЧК}, p = 0,9$	8,04%	4,69%	0,11%	0,464%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	2,3358	0,89148	0,01855	0,0681
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,9$	29,04 $\pm$ 2,3358 (31,37-26,70)	19,013 $\pm$ 0,89148 (19,5790-18,12)	16,357 $\pm$ 0,01855 (16,38-16,34)	14,67 $\pm$ 0,0681 (14,74-14,60)

Таблиця Е.12 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

$n_{\partial}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
$E_{HЧК.E.i}$	14,597	16,119	13,514	14,23
$E_{HЧК.f} = \frac{n}{0,073231 \cdot n - 0,64360}$	15,295	14,622	14,329	14,090
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	14,946	15,3705	13,9215	14,16
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$\begin{vmatrix} 0,349; \\ 0,349; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,748; \\ 0,748; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,408; \\ 0,408; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,07; \\ 0,07; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	0,243602	1,11901	0,3329	0,0098
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,201495	0,4318	0,2356	0,0404
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,3808	0,8162	0,4453	0,0764
$\delta E_{HЧК} = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{HЧК}} \cdot 100\%$	2,55%	5,31%	3,2%	0,54%
$\Delta E_{HЧК.f.i} = \frac{E_{HЧК.f.i} \cdot \delta E_{HЧК}}{100}$	0,3897	0,776	0,458	0,076
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	15,295 $\pm$ 0,3897 (15,68-14,90)	14,622 $\pm$ 0,776 (15,40-13,85)	14,329 $\pm$ 0,458 (14,79-13,87)	14,090 $\pm$ 0,076 (14,17-14,01)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,5351	1,26086	0,68795	0,117968
$\delta E_{HЧК}, p = 0,9$	3,58%	8,20%	4,94%	0,83%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,5476	1,1994	0,7081	0,1174
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}, p = 0,9$	15,295 $\pm$ 0,5476 (15,84-14,75)	14,622 $\pm$ 1,1994 (15,82-13,42)	14,329 $\pm$ 0,7081 (15,04-13,62)	14,090 $\pm$ 0,1174 (14,21-13,97)

Таблиця Е.13 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	23,675	19,852	19,717	17,775
$E_{HЧК.f} = 2849,816604 / C + 17,020136$	24,145	20,582	18,696	18,160
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	23,91	20,217	19,2065	17,9675
$\Delta E_{HЧК.ВП.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,235 $; 0,235; 0	0,365; $ 0,365 $; 0	0,5105; $ 0,5105 $; 0	$ 0,1925 $; 0,1925; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.ВП.i}^2$	0,11045	0,26645	0,52122	0,074112
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,135677	0,21073	0,2947	0,111139
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,2564	0,39828	0,55705	0,21005
$\delta E_{HЧК}$	1,07%	1,97%	2,90%	1,17%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,259	0,405	0,542	0,212
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	24,14 $\pm$ 0,26 (24,4-23,88)	20,58 $\pm$ 0,40 (20,98-20,18)	18,70 $\pm$ 0,54 (19,24-18,16)	18,16 $\pm$ 0,21 (18,18-17,76)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,39618	0,6153316	0,8605	0,324526
$\delta E_{HЧК}$	1,66%	3,04%	4,48%	1,81%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,40	0,6264	0,8376	0,3280
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	24,14 $\pm$ 0,4 (24,54-23,74)	20,58 $\pm$ 0,6264 (21,21-19,96)	18,70 $\pm$ 0,8376 (19,53-17,86)	18,16 $\pm$ 17,83 (18,49-17,76)

Таблиця Е.14 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	15,728	14,866	13,666	13,975
$E_{HЧК.f} = 854,90981 / C + 13,50631$	15,644	14,575	14,009	13,848
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	15,686	14,7205	13,8375	13,9115
$\Delta E_{HЧК.ВП.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,042 $; 0,042; 0	0,1455; $ 0,1455 $; 0	0,1715; $ 0,1715 $; 0	$ 0,0635 $; 0,0635; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.ВП.i}^2$	0,003528	0,04234	0,058824	0,00806
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,024249	0,0840	0,0990	0,03666
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,04583	0,15877	0,18714	0,06929
$\delta E_{HЧК}$	0,29%	1,08%	1,35%	0,5%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,0457	0,157	0,189	0,069
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	15,64 $\pm$ 0,04 (15,68-15,6)	14,58 $\pm$ 0,16 (14,74-14,42)	14,01 $\pm$ 0,19 (14,2-13,82)	13,85 $\pm$ 0,07 (13,92-13,78)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,0708	0,24528	0,28908	0,10705
$\delta E_{HЧК}$	0,45%	1,67%	2,089%	0,77%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,0708	0,2428	0,2927	0,1066
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	15,64 $\pm$ 0,0708 (15,71-15,57)	14,58 $\pm$ 0,16 (14,82-14,33)	14,01 $\pm$ 0,2927 (14,30-13,72)	13,85 $\pm$ 0,1066 (13,95-13,74)

Таблиця Е.15 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	24,001	18,689	20,696	17,634
$E_{HЧК.f} = 22,06057 \cdot \beta^{-0,036446}$	23,992	19,285	18,896	18,724
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	23,9965	18,987	19,796	18,179
$\Delta E_{HЧК.B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,0045 $; 0,0045; 0	0,298; $ 0,298 $; 0	0,9; $ 0,9 $; 0	$ 0,545 $; 0,545; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.B\Pi.i}^2$	0,0000405	0,177608	1,62	0,59405
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,002598	0,17205	0,519615	0,31466
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,004910	0,32518	0,98207	0,594699
$\delta E_{HЧК}$	0,02%	1,71%	4,96%	3,27%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,005	0,330	0,937	0,612
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	23,992±0,005 (24,0-23,99)	19,28±0,33 (19,61-18,95)	18,90±0,94 (19,84-17,96)	18,72±0,61 (19,33-18,11)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,007586	0,502387	1,5173	0,9188
$\delta E_{HЧК}$	0,0316%	2,646%	7,66%	5,054%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,00758	0,5103	1,4483	0,9463
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	23,992±0,008 (24,0-23,98)	19,28±0,5103 (19,80-18,77)	18,90±1,4483 (20,34-17,45)	18,72±0,9463 (19,67-17,77)

Таблиця Е.16 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{HЧК.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{T.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{HЧК.E}$	15,747	14,265	13,886	14,337
$E_{HЧК.f} = 15,17554 - 0,243438 \cdot \ln \beta$	15,736	14,278	14,141	14,080
$\bar{E}_{HЧК} \equiv E_{HЧК.B.i}$	15,7415	14,2715	14,0135	14,2085
$\Delta E_{HЧК.B\Pi.i} = \bar{E}_{HЧК} - E_{HЧК.i}$	$ 0,0055 $; 0,0055; 0	0,0065; $ 0,0065 $; 0	0,1275; $ 0,1275 $; 0	$ 0,1285 $; 0,1285; 0
$\sum \Delta E_{HЧК.B\Pi.i}^2$	0,0000605	0,0000845	0,0325125	0,0330245
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,003175	0,0037528	0,07361	0,074189
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,00600	0,007093	0,13912698	0,140218
$\delta E_{HЧК}$	0,038%	0,0497%	0,99%	0,99%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,006	0,007	0,140	0,139
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	15,736±0,006 (15,74-15,73)	14,278±0,007 (14,28-14,27)	14,14±0,14 (14,28-14,00)	14,08±0,14 (14,22-13,94)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,00927	0,01096	0,2149	0,21663
$\delta E_{HЧК}$	0,059%	0,077%	1,534%	1,525%
$\Delta E_{HЧК.f.i}$	0,0093	0,010994	0,2169	0,2147
$E_{HЧК.f.i} \pm \Delta E_{HЧК.f.i}$	15,736±0,0093 (15,74-15,73)	14,278±0,011 (14,29-14,27)	14,14±0,2169 (14,36-13,92)	14,08±0,2147 (14,29-13,86)

Геометричні параметри долота ІІІ-93Т-ЦА наведено в табл. Е.17.

Таблиця Е.17 – Геометричні параметри долота ІІІ-93Т-ЦА

№ шарошки	Діаметр шарошки	Периферійний вінець	
		Крок зубців t , мм	Число зубців Z_{msn}
I	58,3	13,4	14
II	58,75	14,1	13
III	59,45	12,2	15

Під час буріння шарошковими долотами із фрезерованими зубцями на вибої свердловини утворюється зубчаста периферійна рейка, яка впливає на процес взаємодії долота з вибоєм і збільшує або зменшує коефіцієнт проковзування. Результатом цього є відмінність між теоретичним і експериментальним значеннями частоти зубцевих коливань.

За кількістю виступів периферійної рейки експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначається за формулою

$$f_{зуб} = \frac{1}{t_{зуб}} = \frac{Z_P}{T} \Gamma\text{ц}, \quad (\text{Е.1})$$

де $t_{зуб}$ – час зубкових коливань, с; Z_P – число виступів рейки; T – час руху шарошки по периферійній рейці, с, що визначається за формулою

$$T = \frac{L}{V} = \frac{\pi \cdot d_{CB}}{\omega_{III} \cdot R_{III}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot i}{\omega_D \cdot R_{III}} = \frac{\pi \cdot d_{CB} \cdot 30 \cdot d_{III}}{\pi \cdot n_{ДОЛ} \cdot R_{III} \cdot D_{ДОЛ}} = \frac{d_{CB} \cdot 60}{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ}}, \text{с} \quad (\text{Е.2})$$

де d_{CB} – діаметр свердловини, мм; ω_{III} – кутова швидкість обертання шарошки, с^{-1} ; R_{III} – радіус шарошки, мм.

$$f_{зуб.Е} = \frac{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ} \cdot Z_P}{d_{CB} \cdot 60} \Gamma\text{ц}, \quad (\text{Е.3})$$

Під час буріння долотом 93Т, частота обертання 82 хв^{-1} , в пісковнику воротищенської світи число виступів периферійної рейки – $Z_P=18$, рис. Е.1. За наведеними вище матеріалом теоретичне і експериментальне значення частоти зубцевих коливань визначаються за формулами (Е.4)-(Е.6).

$$f_{зуб}^T = \frac{D_{ДОЛ} \cdot n_{ДОЛ} \cdot Z_{min}}{d_{III} \cdot 60} = \frac{93 \cdot 82 \cdot 13}{58,75 \cdot 60} = 28,12 \approx 28 \Gamma\text{ц} \quad (\text{Е.4})$$

$$\text{При } d_{CB} \approx D_{ДОЛ} \rightarrow T = \frac{d_{CB} \cdot 60}{n_{ДОЛ} \cdot D_{ДОЛ}} = \frac{93 \cdot 60}{82 \cdot 93} = 0,7317 \approx 0,732 \text{с} \quad (\text{Е.5})$$

$$f_{зуб}^E = \frac{1}{t_{зуб}} = \frac{Z_P}{T} = \frac{18}{0,732} = 24,59 \approx 24,6 \Gamma\text{ц} \quad (\text{Е.6})$$

В таблиці Е.18 наведено теоретичні і експериментальні значення зубцевих коливань долота ІІІ-93Т-ЦА залежно від частоти його обертання.

Таблиця Е.18

$n_{ДОЛ}=82$			$n_{ДОЛ} 133$		
$f_{зуб}^T$	T	$f_{зуб}^E$	$f_{зуб}^T$	T	$f_{зуб}^E$
28,1	0,732	24,6-26	45,6	0,451	39,9-42,13
$n_{ДОЛ}=188$			$n_{ДОЛ}=285$		
$f_{зуб}^T$	T	$f_{зуб}^E$	$f_{зуб}^T$	T	$f_{зуб}^E$
64,48	0,3191	56,4-59,54	97,75	0,2105	85,5-90,26



Рис. Е.1 – Поверхня вибою свердловини під час буріння долотом 93Т в пісковнику воротищенської світи твердістю $p_{III}=1440$ МПа, число зубців периферійної рейки – 18.

На рисунку Е.2 наведено типову спектрограму внутрішньої структури (графік спектральної щільності) обертового моменту на долоті.

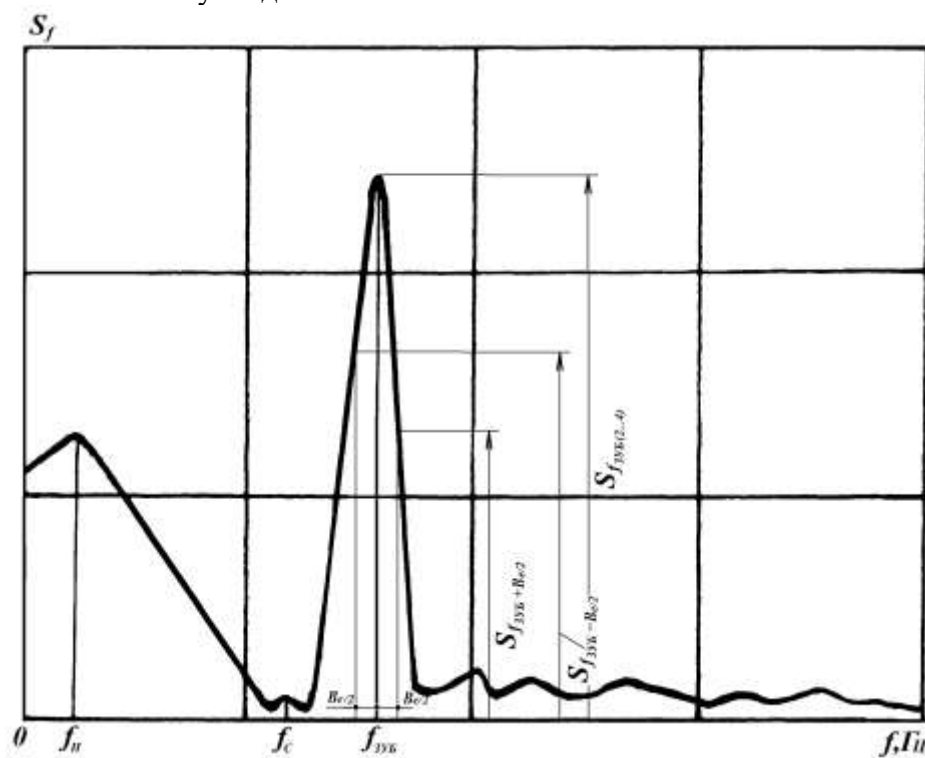


Рисунок Е.2 –Типова спектрограма (графік спектральної щільності) внутрішньої структури крутного моменту на долоті

За цим рисунком $S_{f3УБ}$ – значення спектральної щільності (дисперсії) на частоті зубцевих коливань; B_e – еквівалентна розрізняюча здатність енергетичного спектру; $S_{f3УБ \pm B_e/2}$ – значення спектральної щільності (дисперсії) на частотах $f_{3УБ-B_e/2}$ і $f_{3УБ+B_e/2}$.

Еквівалентна розрізняюча здатність енергетичного спектру визначається за формулою

$$B_e = \frac{1}{mh}, \Gamma\text{ц} \quad (\text{E.7})$$

де m – число кроків кореляційної функції; h – інтервал дискретності, с.

Для одержання достовірної оцінки СЩ на частоті зубцевих коливань, за результатами аналізу тільки однієї реалізації, використовується метод, який називається «вирівнюванням по частоті». За цим способом достовірна оцінка СЩ одержана шляхом усереднення значень СЩ в інтервалі частот рівних B_e і визначається за формулою

$$\bar{S}_{3УБ} = (S_{3УБ-B/2} + S_{3УБ} + S_{3УБ+B/2}) / 3. \quad (\text{E.8})$$

Сумарна енергія СЩ в інтервалі B_e рівна

$$CE = S_{3УБ-B/2} + S_{3УБ} + S_{3УБ+B/2}. \quad (\text{E.9})$$

Таблиця Е.19 –Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{3К.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3К.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{3К.i}$	4,1675	5,4853	7,1754	8,914
$E_{3К.f.i} = 0,318592 \cdot F + 0,86019$	4,0461	5,6391	7,2320	8,8250
$\bar{E}_{3К.i} \equiv E_{3К.B.i}$	4,1068	5,5622	7,2037	8,8695
$\Delta E_{ВП.i} = \bar{E}_{3К} - E_{3К.i}$	$[-0,0607];$ $0,0607; 0$	$0,0769;$ $[-0,0769]; 0$	$0,0283;$ $[-0,0283]; 0$	$[0,0445];$ $0,0445; 0$
$\sum \Delta E_{ВП.i}^2$	0,00736898	0,0118272	0,00160178	0,0039605
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,035045	0,0443982	0,016339	0,025692
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	0,066235	0,083913	0,0308807	0,048558
δE_i	1,61%	1,51%	0,43%	0,55%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3К.f.i} \cdot \delta E}{100}$	0,065256	0,0850727	0,0310	0,0483
$E_{3К.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,8$	4,0461±0,0526 (4,111-3,981)	5,6391±0,0851 (5,724-5,554)	7,232±0,0310 (7,263-7,201)	8,825±0,0483 (8,873-8,777)
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	0,10233	0,129643	0,04771	0,07502
$\delta E_i, p = 0,9$	2,49%	2,33%	0,66%	0,846%
$\Delta E_{f.i}, p = 0,9$	0,1008	0,1278	0,0479	0,0746
$E_{3К.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,9$	4,0461±0,1008 (3,945-4,147)	5,6391±0,1278 (5,511-5,767)	7,232±0,03479 (7,184-7,280)	8,825±0,0746 (8,75-8,90)

Таблиця Е.20 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{3K.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3K.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $E_{3K.i}$	2,6246	5,1418	5,9633	8,617
$E_{3K.f.i} = 0,37547 \cdot F - 0,98405$	2,7706	4,648	6,5254	8,4027
$\bar{E}_{3K.i} \equiv E_{3K.B.i}$	2,6976	4,8949	6,24435	8,50985
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_{3K.i} - E_{3K.i}$	$ -0,073 $; 0,073; 0	0,2469; $ -0,2469 $; 0	0,28105; $ -0,0283 $; 0	$ 0,10715 $; 0,0445;0
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	0,010658	0,0609596	0,15797782	0,022962
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,0421466	0,1007965	0,1622643	0,061863
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P:m} = 1,89$	0,07966	0,19050539	0,3066795	0,11692
δE_i	2,95%	3,89%	4,91%	1,37%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3K.f.i} \cdot \delta E}{100}$	0,08181	0,18089625	0,320482756	0,115449
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,8$	2,7706 $\pm$ 0,0818 (2,689-2,852)	4,648 $\pm$ 0,1809 (4,467-4,829)	6,5254 $\pm$ 0,3205 (6,205-7,263)	8,4027 $\pm$ 0,1154 (8,287-8,518)
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P:m} = 2,92$	0,123068	0,294325	0,473812	0,18064
$\delta E_i, p = 0,9$	4,562%	6,013%	7,588%	2,122716
$\Delta E_{f.i}, p = 0,9$	0,126398	0,27948	0,4951	0,17836
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,9$	2,7706 $\pm$ 0,1264 (2,64-2,90)	4,648 $\pm$ 0,2795 (4,37-4,927)	6,5254 $\pm$ 0,4951 (6,030-7,0205)	8,4027 $\pm$ 0,1784 (8,224-8,581)

Таблиця Е.21 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{3K.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3K.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

n_o , хв ⁻¹	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{3K.i}$	8,2949	6,0695	5,6884	5,6894
$E_{3K.f.i} = n_i / 0,196283 \cdot n_i - 5,025297$	7,4075	6,3092	5,8979	5,5975
$\bar{E}_{3K.i} \equiv E_{3K.B.i}$	7,8512	6,18935	5,79315	5,64345
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_{3K.i} - E_{3K.i}$	$ 0,4437 $; 0,4437; 0	0,11985; $ -0,11985 $; 0	0,10475; $ -0,10475 $; 0	$ 0,04595 $; 0,04595;0
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	0,39374	0,028728	0,021945	0,0042228
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,2562	0,069195	0,060477	0,026529
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P:m} = 1,89$	0,4842	0,13078	0,1143	0,05014
$\delta E_i = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	6,17%	2,11%	1,97%	0,89%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{T.f.i} \cdot \delta E_i}{100}$	0,4568	0,1333	0,1164	0,0497
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	7,4075 $\pm$ 0,4568 (7,8643-6,9507)	6,3092 $\pm$ 0,1333 (6,4425-6,1759)	5,8979 $\pm$ 0,1164 (6,0143-5,7815)	5,5975 $\pm$ 0,0497 (5,6472-5,5478)
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P:m} = 2,92$	0,74802	0,2020494	0,17659284	0,0774647
$\delta E_i, p = 0,9$	9,527%	3,264%	3,048%	1,373%
$\Delta E_{f.i}, p = 0,9$	0,70574	0,20596	0,17978	0,0768
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}$	7,4075 $\pm$ 0,7057 (8,113-6,702)	6,3092 $\pm$ 0,206 (6,515-6,103)	5,8979 $\pm$ 0,18 (6,078-5,718)	5,5975 $\pm$ 0,0768 (5,674-5,521)

Таблиця Е.22 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{3K.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3K.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

$n_{\partial}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $E_{3K.i}$	6,2770	5,7468	5,1124	5,2106
$E_{3K.f.i} = n / 0,003401 \cdot n - 0,05683$	6,1760	5,5786	5,3359	5,1514
$\bar{E}_{3K.i} \equiv E_{3K.B.i}$	6,2265	5,6627	5,22415	5,181
$\Delta E_{ВП.i} = \bar{E}_{3K} - E_{3K.i};$	$[-0,0505];$ $0,0505; 0$	$[-0,0841];$ $0,0841; 0$	$0,11175;$ $[-0,11175]; 0$	$0,0296;$ $[-0,0296]; 0$
$\sum \Delta E_{ВП.i}^2$	0,0051005	0,0141456	0,024976	0,001752
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,029156	0,04856	0,06451889	0,0170896
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,055105	0,091769	0,12194	0,032299
$\delta E_i = \frac{ВП_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	0,88%	1,62%	2,33%	0,62%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{T.f.i} \cdot \delta E_i}{100}$	0,0546	0,0904	0,0767	0,0321
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, 0,8$	$6,176 \pm 0,0546$ (6,2306-6,1213)	$5,5786 \pm 0,0904$ (5,6690-5,4882)	$5,3359 \pm 0,0767$ (5,4126-5,2592)	$5,1514 \pm 0,0321$ (5,1835-5,1193)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,085136	0,141795	0,18848	0,0499016
$\delta E_i, p = 0,9$	1,367%	2,504%	3,608%	0,963%
$\Delta E_{f.i}, p = 0,9$	0,08444	0,1388	0,1925	0,0496
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,9$	$6,176 \pm 0,0844$ (6,260-6,092)	$5,5786 \pm 0,0904$ (5,717-5,44)	$5,3359 \pm 0,1925$ (5,528-5,143)	$5,1514 \pm 0,0496$ (5,201-5,102)

Таблиця Е.23 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $E_{3K.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3K.f.i}$, твердість породи 1440 МПа

$\beta, \text{кН}\cdot\text{с}/\text{м}$	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{3K.i}$	8,4241	7,7366	4,9688	4,6128
$E_{3K.f.i} = -0,04673 \cdot \beta + 8,7732$	8,7685	6,9040	5,5021	4,5675
$\bar{E}_{3K.i} \equiv E_{3K.B.i}$	8,5963	7,3203	5,23545	4,59015
$\Delta E_{ВП.i} = \bar{E}_{3K} - E_{3K.i};$	$[-0,1722];$ $0,1722; 0$	$0,4163;$ $[-0,4163]; 0$	$0,26665;$ $[-0,02665]; 0$	$[-0,02265];$ $0,0265; 0$
$\sum \Delta E_{ВП.i}^2$	0,05930568	0,34661138	0,142204445	0,001026045
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,0994197	0,2403509	0,15395045	0,01307698
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,187903	0,454263	0,290966	0,02471549
$\delta E_i = \frac{ВП_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	2,18%	6,20%	5,56%	0,54%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3K.f.i} \cdot \delta E_i}{100}$	0,191667	0,4284296	0,305786	0,024593
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, 0,8$	$8,7685 \pm 0,1917$ (8,9602-8,5768)	$6,904 \pm 0,4284$ (7,3324-6,4756)	$5,5021 \pm 0,3058$ (5,5808-5,1963)	$4,5675 \pm 0,0246$ (4,5921-4,5429)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	0,290306	0,70182	0,449535	0,0381848
$\delta E_i = \frac{ВП_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	3,377%	9,587%	8,586%	0,832%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3K.f.i} \cdot \delta E_i}{100}$	0,29612	0,6619	0,47243	0,0380
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,9$	$8,7685 \pm 0,2961$ (9,065-8,472)	$6,904 \pm 0,6619$ (7,567-6,242)	$5,5021 \pm 0,4743$ (5,974-5,03)	$4,5675 \pm 0,038$ (4,605-4,53)

Таблиця Е.24 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $E_{3K.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $E_{3K.f.i}$, твердість породи 2050 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $E_{3K.i}$	6,5241	6,5877	5,1694	4,0655
$E_{3K.f.i} = -0,027447 \cdot \beta + 6,959693$	6,9569	5,8618	5,0384	4,4895
$\bar{E}_{3K.i} \equiv E_{3K.B.i}$	6,7405	6,22475	5,1039	4,2775
$\Delta E_{B\Pi.i} = \bar{E}_{3K} - E_{3K.i}$	$ -0,2164 $; 0,2164; 0	0,36295; $ -0,36295 $; 0	0,0665; $ -0,0655 $; 0	$ -0,0212 $; 0,212; 0
$\sum \Delta E_{B\Pi.i}^2$	0,0936579	0,2634654	0,0085805	0,089888
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,124938	0,209549	0,0378164	0,122398
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	0,236134	0,396048	0,0714731	0,231333
$\delta E_i = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	3,50%	6,36%	1,40%	5,41%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3K.f.i} \cdot \delta E}{100}$	0,243715	0,372955	0,07055	0,24279
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, 0,8$	6,9569 $\pm$ 0,2437 (7,2006-6,7132)	5,8618 $\pm$ 0,3730 (6,2348-5,4888)	5,0384 $\pm$ 0,0706 (5,1090-4,9678)	4,4895 $\pm$ 0,2428 (4,7323-4,2467)
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	0,36482	0,611883	0,11042389	0,35740
$\delta E_i = \frac{B\Pi_i}{\bar{E}_{3K}} \cdot 100\%$	5,412%	9,83%	2,164%	8,36%
$\Delta E_{f.i} = \frac{E_{3K.f.i} \cdot \delta E}{100}$	0,37702	0,5762	0,1090	0,3751
$E_{3K.f.i} \pm \Delta E_{f.i}, p = 0,9$	6,9569 $\pm$ 0,3770 (7,334-6,58)	5,8618 $\pm$ 0,5732 (6,438-5,285)	5,0384 $\pm$ 0,109 (5,1090-4,9294)	4,4895 $\pm$ 0,3751 (4,865-4,114)

Таблиця Е.25 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 1440 МПа

n_{∂} , хв ⁻¹	82	133	188	285
Експериментальні значення $K_{дин.лн.i}$	0,101	0,096	0,1012	0,1024
$K_{дин.лн.f} = 0,104163 - 0,60109/n$	0,0968	0,0996	0,10097	0,1021
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.B.i}$	0,0989	0,0978	0,101085	0,10225
$\Delta K_{дин.лн.i} = \bar{K}_{дин.лн.i} - K_{дин.лн.i}$	$ 0,0021 $; 0,0021; 0	$ 0,0018 $; 0,0018; 0	$ 0,000115 $; 0,000115; 0	$ 0,00015 $; 0,00015; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$8,82 \cdot 10^{-6}$	$6,48 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$1,2124 \cdot 10^{-3}$	$1,0392 \cdot 10^{-3}$	$6,6395 \cdot 10^{-5}$	$8,6602 \cdot 10^{-5}$
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	$2,0023 \cdot 10^{-3}$	$1,9641 \cdot 10^{-3}$	$1,2549 \cdot 10^{-4}$	$1,6368 \cdot 10^{-4}$
δK_i	2,32%	2,01%	0,12%	0,16%
$\Delta K_{f.i}$	0,002	0,002	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	0,0968 $\pm$ 0,002 (0,0948-0,0988)	0,0996 $\pm$ 0,002 (0,0976-0,1016)	0,10097 $\pm$ 1,2 $\cdot 10^{-4}$ (0,1008-0,1011)	0,1021 $\pm$ 1,63 $\cdot 10^{-4}$ (0,1019-0,1022)
$B\Pi_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$1,939 \cdot 10^{-4}$	$2,529 \cdot 10^{-4}$
δK_i	3,58%	3,103%	0,192%	0,247%
$\Delta K_{f.i}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,09 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	0,0968 $\pm$ 0,002 (0,0933-0,1003)	0,0996 $\pm$ 3,09 $\cdot 10^{-3}$ (0,0965-0,1027)	0,10097 $\pm$ 1,94 $\cdot 10^{-4}$ (0,1008-0,1012)	0,1021 $\pm$ 2,52 $\cdot 10^{-4}$ (0,1018-0,1024)

Таблиця Е.26 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 2050 МПа

$n_{\delta}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $K_{дин.лн.i}$	0,081	0,0891	0,0889	0,0961
$K_{дин.лн.f} = -1,838369 / n + 0,1016678$	0,0792	0,0878	0,0919	0,0952
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.в.i}$	0,0801	0,08845	0,0904	0,09565
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,0009 $; 0,0009; 0	$ 0,00065 $; 0,00065; 0	$ 0,0015 $; 0,0015; 0	$ 0,00045 $; 0,00045; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$1,62 \cdot 10^{-6}$	$8,45 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$5,19615 \cdot 10^{-4}$	$3,7528 \cdot 10^{-4}$	$8,6602 \cdot 10^{-4}$	$2,5981 \cdot 10^{-4}$
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	$9,8207 \cdot 10^{-4}$	$7,0927 \cdot 10^{-4}$	$1,6368 \cdot 10^{-3}$	$4,9104 \cdot 10^{-4}$
$\delta K_i, P = 0,8$	1,23%	0,80%	1,81%	0,51%
$\Delta K_{f.i}, P = 0,8$	$9,7104 \cdot 10^{-4}$	$7,0406 \cdot 10^{-4}$	$1,6639 \cdot 10^{-3}$	$4,8873 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0792 \pm 9,7104 \cdot 10^{-4}$ (0,0802-0,0782)	$0,0878 \pm 7,0406 \cdot 10^{-4}$ (0,0885-0,0871)	$0,0919 \pm 1,66 \cdot 10^{-3}$ (0,0936-0,0902)	$0,0952 \pm 4,87 \cdot 10^{-4}$ (0,0957-0,0947)
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	$15,172758 \cdot 10^{-4}$	$1,09581 \cdot 10^{-3}$	$2,52879 \cdot 10^{-3}$	$7,58638 \cdot 10^{-4}$
δK_i	1,894%	1,239%	2,797%	0,793%
$\Delta K_{f.i}$	0,00150	$1,087757 \cdot 10^{-3}$	$2,528794 \cdot 10^{-3}$	$7,55069 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0792 \pm 0,0015$ (0,0777-0,0807)	$0,0878 \pm 1,0877 \cdot 10^{-3}$ (0,0867-0,0889)	$0,0919 \pm 2,5288 \cdot 10^{-3}$ (0,0894-0,09442)	$0,0952 \pm 7,55 \cdot 10^{-4}$ (0,09444-0,0960)

Таблиця Е.27 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(F_{CT})$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 1440 МПа

$F_{CT}, \text{кН}$	10	15	20	25
Експериментальні значення $K_{дин.лн.i}$	0,0959	0,099	0,0969	0,1085
$K_{дин.лн.f} = 0,104163 - 0,60109 / n$	0,0925	0,0991	0,1027	0,1050
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.в.i}$	0,0942	0,09905	0,0998	0,10675
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,0017 $; 0,0017; 0	$ 0,00005 $; 0,00005; 0	$ 0,0029 $; 0,0029; 0	$ 0,00175 $; 0,00175; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$5,78 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$1,682 \cdot 10^{-5}$	$6,125 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$9,8150 \cdot 10^{-4}$	$2,8867 \cdot 10^{-5}$	$1,6743 \cdot 10^{-3}$	$1,0104 \cdot 10^{-3}$
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 1,89$	$1,8550 \cdot 10^{-3}$	$5,4559 \cdot 10^{-5}$	$3,1644 \cdot 10^{-3}$	$1,9096 \cdot 10^{-3}$
$\delta K_i, P = 0,8$	1,97%	0,06%	3,17%	1,79%
$\Delta K_{f.i}, P = 0,8$	$1,8215 \cdot 10^{-3}$	$5,4587 \cdot 10^{-5}$	$3,2564 \cdot 10^{-3}$	$1,8783 \cdot 10^{-3}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0925 \pm 1,822 \cdot 10^{-3}$ (0,0907-0,0943)	$0,0991 \pm 5,4587 \cdot 10^{-5}$ (0,0990-0,0992)	$0,1027 \pm 3,256 \cdot 10^{-3}$ (0,0994-0,1060)	$0,1050 \pm 1,878 \cdot 10^{-3}$ (0,1032-0,1069)
$ВП_i = t_{p.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{p.m} = 2,92$	$2,866 \cdot 10^{-3}$	$8,4293 \cdot 10^{-5}$	$4,8890 \cdot 10^{-3}$	$2,950259 \cdot 10^{-3}$
$\delta K_i, P = 0,9$	3,042%	0,085%	4,899%	2,764%
$\Delta K_{f.i}, P = 0,9$	$2,8142 \cdot 10^{-3}$	$8,4335 \cdot 10^{-5}$	$5,031067 \cdot 10^{-3}$	$2,901894 \cdot 10^{-3}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0925 \pm 2,814 \cdot 10^{-3}$ (0,0897-0,0953)	$0,0991 \pm 8,4335 \cdot 10^{-5}$ (0,0990-0,0992)	$0,1027 \pm 5,031 \cdot 10^{-3}$ (0,0977-0,1077)	$0,1050 \pm 2,902 \cdot 10^{-3}$ (0,1021-0,1079)

Таблиця Е.28 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(F_{CT})$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 2050 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $K_{дин.лн.i}$	0,0766	0,0818	0,0935	0,1032
$K_{дин.лн.f} = 0,061535 \cdot e^{0,020558 \cdot F}$	0,0756	0,0838	0,0928	0,1029
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.В.i}$	0,0761	0,0828	0,09315	0,10305
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,0005 $; 0,0005; 0	$ 0,001 $; 0,001; 0	$ 0,00035 $; 0,00035; 0	$ 0,00015 $; 0,00015; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_{В.i} = \sqrt{D_{В.i}}$	$2,8868 \cdot 10^{-4}$	$5,7735 \cdot 10^{-4}$	$2,0207 \cdot 10^{-4}$	$8,6602 \cdot 10^{-5}$
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{В.i}, t_{P.m} = 1,89$	$5,4560 \cdot 10^{-4}$	$1,0912 \cdot 10^{-3}$	$3,8192 \cdot 10^{-4}$	$1,6368 \cdot 10^{-4}$
$\delta K_i, P = 0,8$	0,72%	1,32%	0,41%	0,16%
$\Delta K_{f.i}, P = 0,8$	$5,4201 \cdot 10^{-4}$	$1,1044 \cdot 10^{-3}$	$3,8048 \cdot 10^{-4}$	$1,6344 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0756 \pm 5,4201 \cdot 10^{-4}$ (0,0761-0,0750)	$0,0838 \pm 1,1044 \cdot 10^{-3}$ (0,0849-0,0827)	$0,0928 \pm 3,8048 \cdot 10^{-4}$ (0,0932-0,0924)	$0,1029 \pm 1,6344 \cdot 10^{-4}$ (0,1031-0,1027)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{В.i}, t_{P.m} = 2,92$	$8,42931 \cdot 10^{-4}$	$1,685862 \cdot 10^{-3}$	$5,90051 \cdot 10^{-4}$	$2,52879 \cdot 10^{-4}$
$\delta K_i, P = 0,9$	1,108%	2,036%	0,633%	0,245%
$\Delta K_{f.i}, P = 0,9$	$8,37393 \cdot 10^{-4}$	$1,706222 \cdot 10^{-3}$	$5,87834 \cdot 10^{-4}$	$2,522511 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0756 \pm 8,3793 \cdot 10^{-4}$ (0,0764-0,0748)	$0,0838 \pm 1,1044 \cdot 10^{-3}$ (0,0855-0,0821)	$0,0928 \pm 5,8783 \cdot 10^{-4}$ (0,0934-0,0922)	$0,1029 \pm 2,5225 \cdot 10^{-4}$ (0,1032-0,1026)

Таблиця Е.29 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 1440 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні з-ня $K_{дин.лн}$	0,0927	0,1050	0,1134	0,0891
$K_{дин.лн} = 0,0711628 +$ $+ 0,0000608 \cdot C - 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$	0,0920	0,1061	0,1126	0,0892
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.В.i}$	0,09235	0,10555	0,113	0,08915
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,00035 $; 0,00035; 0	$ 0,00055 $; 0,00055; 0	$ 0,0004 $; 0,0004; 0	$ 0,00005 $; 0,00005; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$6,05 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$
$\sigma_{В.i} = \sqrt{D_{В.i}}$	$2,0207 \cdot 10^{-4}$	$3,1754 \cdot 10^{-4}$	$2,3094 \cdot 10^{-4}$	$2,8867 \cdot 10^{-5}$
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{В.i}, t_{P.m} = 1,89$	$3,8192 \cdot 10^{-4}$	$6,00155 \cdot 10^{-4}$	$4,3648 \cdot 10^{-4}$	$5,4559 \cdot 10^{-5}$
δK_i	0,41%	0,5686%	0,386%	0,061%
$\Delta K_{f.i}$	$3,8047 \cdot 10^{-4}$	$6,03282 \cdot 10^{-4}$	$4,3493 \cdot 10^{-4}$	$5,459 \cdot 10^{-5}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0920 \pm 3,805 \cdot 10^{-4}$ (0,0924-0,0916)	$0,1061 \pm 6,033 \cdot 10^{-4}$ (0,1067-0,1055)	$0,1126 \pm 4,349 \cdot 10^{-4}$ (0,1130-0,1122)	$0,0892 \pm 5,459 \cdot 10^{-5}$ (0,08925-0,0891)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{В.i}, t_{P.m} = 2,92$	$5,90051 \cdot 10^{-4}$	$9,27224 \cdot 10^{-4}$	$6,74345 \cdot 10^{-4}$	$8,4293 \cdot 10^{-5}$
δK_i	0,639%	0,8785%	0,597%	0,0946%
$\Delta K_{f.i}$	$5,87815 \cdot 10^{-4}$	$9,32056 \cdot 10^{-4}$	$6,71958 \cdot 10^{-4}$	$8,434 \cdot 10^{-5}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0920 \pm 5,878 \cdot 10^{-4}$ (0,0926-0,0914)	$0,1061 \pm 9,320 \cdot 10^{-4}$ (0,107-0,1052)	$0,1126 \pm 6,719 \cdot 10^{-4}$ (0,1133-0,1119)	$0,0892 \pm 8,434 \cdot 10^{-5}$ (0,0893-0,08912)

За рівнянням частинної залежності $K_{\text{дин.лн}} = 0,0711628 + 0,0000608 \cdot C - 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$ локальний максимум зафіксований для жорсткості

$$0 = 0,0000608 - 2 \cdot 2,14284 \cdot 10^{-8} \cdot C \rightarrow C = 1419 \text{ кН / м. } K_{\text{дин.лн max}} = 0,1143.$$

90% довірчий інтервал для значення 0,1143 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta K_{f,i} = 9,32056 \cdot 10^{-4}$; при $C = 1700 - \Delta K_{f,i} = 6,71958 \cdot 10^{-4}$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta E_f = 9,32056 \cdot 10^{-4} - 6,71958 \cdot 10^{-4} = 2,60098 \cdot 10^{-4}$.

За цим на $1 \text{ кН / м } \Delta K'_f = 2,60098 \cdot 10^{-4} / 900 = 2,88 \cdot 10^{-7}$. За різницею $1419 - 800 = 619$ одержимо $\Delta K_{f,800} - \Delta K_f \cdot 619 = 9,32056 \cdot 10^{-4} - 2,88 \cdot 10^{-7} \cdot 619 = 7,53166 \cdot 10^{-4}$.

90% довірчий інтервал для значення $0,1143 \pm 7,53166 \cdot 10^{-4} = 0,1135 - 0,1150$.

Таблиця Е.30 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{\text{дин.лн.f}} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $K_{\text{дин.лн.f}}$, твердість породи 2050 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні з-ня $K_{\text{дин.лн}}$	0,0756	0,1023	0,0993	0,0779
$K_{\text{дин.лн}} = 0,0547701 +$ $+ 0,0000713 \cdot C - 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$	0,0793	0,0958	0,10366	0,0766
$\bar{K}_{\text{дин.лн.i}} \equiv K_{\text{дин.лн.в.i}}$	0,07745	0,09905	0,10148	0,07725
$\Delta K_{\text{дин.лн.i}}$	$ 0,00185 $; 0,00185; 0	$ 0,00325 $; 0,00325; 0	$ 0,00218 $; 0,00218; 0	$ 0,00065 $; 0,00065; 0
$\sum \Delta K_{\text{дин.лн.i}}^2$	$6,845 \cdot 10^{-6}$	$2,1125 \cdot 10^{-5}$	$9,504 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 45^{-7}$
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	$1,0681 \cdot 10^{-3}$	$1,8764 \cdot 10^{-3}$	$1,2586 \cdot 10^{-3}$	$3,75277 \cdot 10^{-4}$
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{p,m} = 1,89$	$2,0187 \cdot 10^{-3}$	$3,5464 \cdot 10^{-3}$	$2,3788 \cdot 10^{-3}$	$7,0927 \cdot 10^{-4}$
δK_i	2,61%	3,58%	2,34%	0,92%
$\Delta K_{f,i}$	$2,0669 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$2,4299 \cdot 10^{-3}$	$7,03306 \cdot 10^{-5}$
$K_{\text{дин.лн.f.i}} \pm \Delta K_{f,i}$	$0,0793 \pm 2,067 \cdot 10^{-3}$ (0,0814-0,0772)	$0,0958 \pm 3,43 \cdot 10^{-3}$ (0,0992-0,0924)	$0,1037 \pm 2,43 \cdot 10^{-3}$ (0,1061-0,10123)	$0,0766 \pm 7,033 \cdot 10^{-4}$ (0,0773-0,0759)
$ВП_i = t_{p,m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{p,m} = 2,92$	$3,118846 \cdot 10^{-3}$	$5,479054 \cdot 10^{-3}$	$3,67518 \cdot 10^{-3}$	$1,09581 \cdot 10^{-3}$
δK_i	4,0269%	5,532%	3,622%	1,4185%
$\Delta K_{f,i}$	$3,193344 \cdot 10^{-3}$	$5,299276 \cdot 10^{-3}$	$3,754131 \cdot 10^{-3}$	$1,08659 \cdot 10^{-3}$
$K_{\text{дин.лн.f.i}} \pm \Delta K_{f,i}$	$0,0793 \pm 3,193 \cdot 10^{-3}$ (0,0825-0,0761)	$0,0958 \pm 5,299 \cdot 10^{-3}$ (0,1011-0,0905)	$0,1037 \pm 3,75 \cdot 10^{-3}$ (0,1074-0,0999)	$0,0766 \pm 1,0867 \cdot 10^{-4}$ (0,0777-0,0755)

За рівнянням частинної залежності $K_{\text{дин.лн}} = 0,0547701 + 0,0000713 \cdot C - 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$ локальний максимум зафіксований для жорсткості

$$0 = 0,0000713 - 2 \cdot 2,50246 \cdot 10^{-8} \cdot C \rightarrow C = 1424 \text{ кН / м. } K_{\text{дин.лн max}} = 0,1056.$$

90% довірчий інтервал для значення 0,1056 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta K_{f,i} = 5,29928 \times 10^{-3}$; при $C = 1700 - \Delta K_{f,i} = 3,75413 \times 10^{-3}$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta E_f = 5,29928 \times 10^{-3} - 3,75413 \times 10^{-3} = 1,54515 \times 10^{-3}$. За цим на $1 \text{ кН / м } \Delta K'_f = 1,54515 \times 10^{-3} / 900 = 1,716 \times 10^{-6}$. За різницею $1424 - 800 = 624$ одержимо $\Delta K_{f,800} - \Delta K_f \times 624 = 5,29928 \times 10^{-3} - 1,716 \times 10^{-6} \times 624 = 4,228496 \times 10^{-3}$.

90% довірчий інтервал для значення $0,1056 \pm 4,228496 \cdot 10^{-4} = 0,1052 - 0,1060$.

Таблиця Е.31 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 1440 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні з-ня $K_{дин.лн}$	0,11	0,108	0,092	0,09
$K_{дин.лн} = 0,11277 \cdot e^{-0,002485 \cdot \beta}$	0,1127	0,1021	0,0948	0,0902
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.в.i}$	0,11135	0,10505	0,0934	0,0901
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,00135 $; 0,00135; 0	$ 0,00295 $; 0,00295; 0	$ 0,0014 $; 0,0014; 0	$ 0,0001 $; 0,0001; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$3,645 \cdot 10^{-6}$	$1,7405 \cdot 10^{-5}$	$3,92 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
$\sigma_{в.i} = \sqrt{D_{в.i}}$	$7,7942 \cdot 10^{-4}$	$1,703183 \cdot 10^{-3}$	$8,0829 \cdot 10^{-4}$	$5,7735 \cdot 10^{-5}$
$ВП_i = t_{р.м} \cdot \sigma_{в.i}, t_{р.м} = 1,89$	$1,4731 \cdot 10^{-3}$	$3,219 \cdot 10^{-3}$	$1,5277 \cdot 10^{-3}$	$1,0912 \cdot 10^{-4}$
δK_i	1,323%	3,06%	1,636%	0,121%
$\Delta K_{f.i}$	$1,4910 \cdot 10^{-3}$	$3,1286 \cdot 10^{-3}$	$1,5506 \cdot 10^{-3}$	$1,0924 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,1127 \pm 1,491 \cdot 10^{-3}$ (0,1142-0,1112)	$0,1021 \pm 3,1286 \cdot 10^{-3}$ (0,1052-0,099)	$0,0948 \pm 1,5506 \cdot 10^{-3}$ (0,0964-0,0932)	$0,0902 \pm 1,0924 \cdot 10^{-4}$ (0,0903-0,0902)
$ВП_i = t_{р.м} \cdot \sigma_{в.i}, t_{р.м} = 2,92$	$2,275914 \cdot 10^{-3}$	$4,973295 \cdot 10^{-3}$	$2,360207 \cdot 10^{-3}$	$1,68586 \cdot 10^{-4}$
δK_i	2,0439%	4,734%	2,527%	0,187%
$\Delta K_{f.i}$	$2,303507 \cdot 10^{-3}$	$4,833635 \cdot 10^{-3}$	$2,395585 \cdot 10^{-3}$	$1,68773 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,1127 \pm 2,304 \cdot 10^{-3}$ (0,1150-0,1104)	$0,1021 \pm 4,8336 \cdot 10^{-3}$ (0,1069-0,0973)	$0,0948 \pm 2,3956 \cdot 10^{-3}$ (0,0972-0,0924)	$0,0902 \pm 1,6877 \cdot 10^{-4}$ (0,0904-0,09003)

Таблиця Е.32 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $K_{дин.лн.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $K_{дин.лн.f}$, твердість породи 2050 МПа

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні з-ня $K_{дин.лн}$	0,0905	0,089	0,087	0,0887
$K_{дин.лн} = 0,00061 / \beta + 0,08815$	0,0942	0,08816	0,088159	0,08815
$\bar{K}_{дин.лн.i} \equiv K_{дин.лн.в.i}$	0,09235	0,08858	0,0875795	0,088425
$\Delta K_{дин.лн.i}$	$ 0,00185 $; 0,00185; 0	$ 0,00042 $; 0,00042; 0	$ 0,0005795 $; 0,0005795; 0	$ 0,000275 $; 0,000275; 0
$\sum \Delta K_{дин.лн.i}^2$	$6,845 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^{-7}$	$6,71 \cdot 10^{-7}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$
$\sigma_{в.i} = \sqrt{D_{в.i}}$	$1,0681 \cdot 10^{-3}$	$2,4249 \cdot 10^{-4}$	$3,3457 \cdot 10^{-4}$	$1,5877 \cdot 10^{-4}$
$ВП_i = t_{р.м} \cdot \sigma_{в.i}, t_{р.м} = 1,89$	$2,0187 \cdot 10^{-3}$	$4,583 \cdot 10^{-4}$	$6,3234 \cdot 10^{-4}$	$3,0008 \cdot 10^{-4}$
δK_i	2,186%	0,517%	0,722%	0,339%
$\Delta K_{f.i}$	$2,0591 \cdot 10^{-3}$	$4,5613 \cdot 10^{-4}$	$6,3653 \cdot 10^{-4}$	$2,9914 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0942 \pm 2,0591 \cdot 10^{-3}$ (0,0962-0,09214)	$0,08816 \pm 4,5613 \cdot 10^{-4}$ (0,08862-0,0877)	$0,088159 \pm 6,3653 \cdot 10^{-4}$ (0,08879-0,08752)	$0,08815 \pm 2,9914 \cdot 10^{-4}$ (0,08845-0,08785)
$ВП_i = t_{р.м} \cdot \sigma_{в.i}, t_{р.м} = 2,92$	$3,118846 \cdot 10^{-3}$	$7,0807 \cdot 10^{-4}$	$9,76957 \cdot 10^{-4}$	$4,636112 \cdot 10^{-4}$
δK_i	3,377%	0,803%	1,1155%	0,5259%
$\Delta K_{f.i}$	$3,181324 \cdot 10^{-3}$	$7,07924 \cdot 10^{-4}$	$9,83421 \cdot 10^{-4}$	$4,63612 \cdot 10^{-4}$
$K_{дин.лн.f.i} \pm \Delta K_{f.i}$	$0,0942 \pm 3,1813 \cdot 10^{-3}$ (0,0974-0,09102)	$0,08816 \pm 7,0792 \cdot 10^{-4}$ (0,08887-0,08745)	$0,088159 \pm 9,8342 \cdot 10^{-4}$ (0,08914-0,08718)	$0,08815 \pm 4,6361 \cdot 10^{-4}$ (0,08861-0,08769)

Таблиця Е.33 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T,\partial,\max,f} = f(n)$, і довірчі інтервали для значень $k_{T,\partial,\max,f}$, твердість породи 1440 МПа

$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $k_{T,\partial,\max,i}$	1,778	2,1326	2,5155	2,6312
$k_{T,\partial,\max,f} = 3,00808 - 104,3303/n$	1,736	2,2236	2,4531	2,6420
$\bar{k}_{T,\partial,\max,i} \equiv k_{T,\partial,\max,i}$	1,757	2,1781	2,4843	2,6366
$\Delta k_{T,\partial,\max,i}$	$ 0,021 ;$ 0,021; 0	$ 0,0455 ;$ 0,0455; 0	$ 0,0312 ;$ 0,0312; 0	$ 0,0054 ;$ 0,0054; 0
$\sum \Delta k^2_{T,\partial,\max,i}$	$8,82 \cdot 10^{-4}$	$4,1405 \cdot 10^{-3}$	$1,9469 \cdot 10^{-3}$	$5,832 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	$1,2124 \cdot 10^{-2}$	$2,6269 \cdot 10^{-2}$	$1,8013 \cdot 10^{-2}$	$3,1177 \cdot 10^{-3}$
$B\Pi_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 1,89$	$2,2915 \cdot 10^{-2}$	$4,9649 \cdot 10^{-2}$	$3,4045 \cdot 10^{-2}$	$5,8924 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i = \frac{B\Pi_i}{\bar{k}_{T,\partial,\max,i}} \cdot 100\%$	1,304%	2,28%	1,37%	0,223%
$\Delta k_{f,i} = \frac{k_{T,\partial,\max,f,i} \cdot \delta k_i}{100}$	$2,2641 \cdot 10^{-2}$	$5,0686 \cdot 10^{-2}$	$3,3618 \cdot 10^{-2}$	$5,9045 \cdot 10^{-3}$
$k_{T,\partial,\max,f,i} \pm \Delta k_{f,i}$	$1,736 \pm 2,2641 \cdot 10^{-2}$ (1,7586-1,7134)	$2,2236 \pm 5,0686 \cdot 10^{-2}$ (2,2743-2,1729)	$2,4531 \pm 3,3618 \cdot 10^{-2}$ (2,4867-2,4195)	$2,642 \pm 5,9045 \cdot 10^{-3}$ (2,6479-2,6361)
$B\Pi_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 2,92$	$3,54031 \cdot 10^{-2}$	$7,6706756 \cdot 10^{-2}$	$5,259892 \cdot 10^{-2}$	$9,10366 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,9$	2,015%	3,5217%	2,117%	0,345%
$\Delta k_{f,i}, P = 0,9$	$3,497997 \cdot 10^{-2}$	$7,830914 \cdot 10^{-2}$	$5,19383 \cdot 10^{-2}$	$9,1223 \cdot 10^{-3}$
$k_{T,\partial,\max,f,i} \pm \Delta k_{f,i}$	$1,736 \pm 3,498 \cdot 10^{-2}$ (1,701-1,771)	$2,2236 \pm 7,8309 \cdot 10^{-2}$ (2,1453-2,3019)	$2,4531 \pm 5,1938 \cdot 10^{-2}$ (2,4012-2,505)	$2,642 \pm 9,1223 \cdot 10^{-3}$ (2,6329-2,6511)

Таблиця Е.34 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T,\partial,\max,f} = f(n)$, і довірчі інтервали для значень $k_{T,\partial,\max,f}$, твердість породи 2050 МПа

$n, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $k_{T,\partial,\max,i}$	2,0266	2,2359	2,3408	2,4574
$k_{T,\partial,\max,f,i} = n/(0,3722 \cdot n + 10,0402)$	2,0217	2,2337	2,3496	2,4544
$\bar{k}_{T,\partial,\max,i} \equiv k_{T,\partial,\max,i}$	2,02415	2,2348	2,3452	2,4559
$\Delta k_{T,\partial,\max,i}$	$ 0,00245 ;$ 0,00245; 0	$ 0,0011 ;$ 0,0011; 0	$ 0,0044 ;$ 0,0044; 0	$ 0,0015 ;$ 0,0015; 0
$\sum \Delta k^2_{T,\partial,\max,i}$	$1,2005 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-6}$	$3,872 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	$1,41451 \cdot 10^{-3}$	$6,35085 \cdot 10^{-4}$	$2,54034 \cdot 10^{-3}$	$8,66025 \cdot 10^{-4}$
$B\Pi_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 1,89$	$2,2673 \cdot 10^{-3}$	$1,2003 \cdot 10^{-3}$	$4,80124 \cdot 10^{-3}$	$1,636788 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,8$	0,132%	0,05%	0,20%	0,07%
$\Delta k_{f,i}, P = 0,8$	$2,2670 \cdot 10^{-3}$	$1,1997 \cdot 10^{-3}$	$4,81025 \cdot 10^{-3}$	$1,635788 \cdot 10^{-3}$
$k_{T,\partial,\max,f,i} \pm \Delta k_{f,i}$	$2,0217 \pm 2,267 \cdot 10^{-3}$ (2,0244-2,0190)	$2,2337 \pm 1,1997 \cdot 10^{-3}$ (2,2349-2,2325)	$2,3496 \pm 4,8102 \cdot 10^{-3}$ (2,3544-2,3448)	$2,4544 \pm 1,6358 \cdot 10^{-3}$ (2,4560-2,4528)
$B\Pi_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 2,92$	$4,130363 \cdot 10^{-3}$	$1,85445 \cdot 10^{-3}$	$7,417796 \cdot 10^{-3}$	$2,528794 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,9$	0,204%	0,083%	0,316%	0,103%
$\Delta k_{f,i}, P = 0,9$	$4,1254 \cdot 10^{-3}$	$1,853536 \cdot 10^{-3}$	$7,431713 \cdot 10^{-3}$	$2,527249 \cdot 10^{-3}$
$k_{T,\partial,\max,f,i} \pm \Delta k_{f,i}$	$2,0217 \pm 4,125 \cdot 10^{-3}$ (2,0176-2,0258)	$2,2337 \pm 1,8535 \cdot 10^{-3}$ (2,2318-2,2355)	$2,3496 \pm 7,4317 \cdot 10^{-3}$ (2,3422-2,3570)	$2,4544 \pm 2,5272 \cdot 10^{-3}$ (2,4569-2,4519)

Таблиця Е.35 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.max.f}$, твердість породи 1440 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $k_{T.\partial.max.i}$	2,1922	2,2108	2,3047	2,3412
$k_{T.\partial.max.} = 2,45512 - 3,0376 / F$	2,1514	2,2526	2,3032	2,3336
$\bar{k}_{T.\partial.max.i} \equiv k_{T.\partial.max.i}$	2,1718	2,2317	2,30395	2,3374
$\Delta k_{T.\partial.max.i}$	$ 0,0204 $; 0,0204; 0	$ 0,0209 $; 0,0209; 0	$ 0,00075 $; 0,00075; 0	$ 0,0038 $; 0,0038; 0
$\sum \Delta k^2_{T.\partial.max.i}$	$8,3232 \cdot 10^{-4}$	$8,7362 \cdot 10^{-4}$	$1,125 \cdot 10^{-6}$	$2,888 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$1,17779 \cdot 10^{-2}$	$1,20666 \cdot 10^{-2}$	$4,33012 \cdot 10^{-4}$	$2,19393 \cdot 10^{-3}$
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}$, $t_{P:m} = 1,89$	$2,2260 \cdot 10^{-2}$	$2,22806 \cdot 10^{-2}$	$8,18394 \cdot 10^{-4}$	$4,14653 \cdot 10^{-3}$
δk_i , $P = 0,8$	1,02%	1,022%	0,0355%	0,1774%
$\Delta k_{f.i}$, $P = 0,8$	$2,20512 \cdot 10^{-2}$	$2,230195 \cdot 10^{-2}$	$8,18127 \cdot 10^{-4}$	$4,13979 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,1514 \pm 2,2051 \cdot 10^{-2}$ (2,1293-2,1734)	$2,2526 \pm 2,2302 \cdot 10^{-2}$ (2,2296-2,2756)	$2,3032 \pm 8,1813 \cdot 10^{-4}$ (2,3024-2,3040)	$2,3336 \pm 4,1398 \cdot 10^{-3}$ (2,3295-2,3377)
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}$, $t_{P:m} = 2,92$	$3,43916 \cdot 10^{-2}$	$3,5234532 \cdot 10^{-2}$	$1,264397 \cdot 10^{-3}$	$6,406278 \cdot 10^{-3}$
δk_i , $P = 0,9$	1,5836%	1,579%	0,0549%	0,2741%
$\Delta k_{f.i}$, $P = 0,9$	$3,4068556 \cdot 10^{-2}$	$3,5564505 \cdot 10^{-2}$	$1,263985 \cdot 10^{-3}$	$6,395863 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,1514 \pm 3,4068 \cdot 10^{-2}$ (2,1173-2,1855)	$2,2526 \pm 3,5564 \cdot 10^{-2}$ (2,2170-2,2882)	$2,3032 \pm 1,2640 \cdot 10^{-3}$ (2,3019-2,3045)	$2,3336 \pm 6,3959 \cdot 10^{-3}$ (2,3272-2,3400)

Таблиця Е.36 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.max.f}$, твердість породи 2050 МПа

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $k_{T.\partial.max.i}$	2,2255	2,2594	2,2373	2,3386
$k_{T.\partial.max.} = 2,3897 - 1,9805 / F$	2,1916	2,2577	2,2907	2,3105
$\bar{k}_{T.\partial.max.i} \equiv k_{T.\partial.max.i}$	2,20855	2,25855	2,264	2,32455
$\Delta k_{T.\partial.max.i}$	$ 0,01695 $; 0,01695; 0	$ 0,00085 $; 0,00085; 0	$ 0,0267 $; 0,0267; 0	$ 0,01405 $; 0,01405; 0
$\sum \Delta k^2_{T.\partial.max.i}$	$5,74605 \cdot 10^{-4}$	$1,445 \cdot 10^{-6}$	$1,42578 \cdot 10^{-3}$	$3,94805 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$9,786087 \cdot 10^{-3}$	$4,90747 \cdot 10^{-4}$	$1,5415252 \cdot 10^{-2}$	$8,11177 \cdot 10^{-3}$
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}$, $t_{P:m} = 1,89$	$1,84957 \cdot 10^{-2}$	$9,27513 \cdot 10^{-4}$	$2,91348 \cdot 10^{-2}$	$1,5331247 \cdot 10^{-2}$
δk_i , $P = 0,8$	0,837%	0,0411%	1,28687%	0,659%
$\Delta k_{f.i}$, $P = 0,8$	$1,8353755 \cdot 10^{-2}$	$9,27164 \cdot 10^{-4}$	$2,94784 \cdot 10^{-2}$	$1,52386 \cdot 10^{-2}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,1916 \pm 1,835 \cdot 10^{-2}$ (2,1732-2,20995)	$2,2577 \pm 9,272 \cdot 10^{-4}$ (2,2568-2,2586)	$2,2907 \pm 2,948 \cdot 10^{-4}$ (2,2612-2,3202)	$2,3105 \pm 1,524 \cdot 10^{-2}$ (2,2953-2,3257)
$B\Pi_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B.i}$, $t_{P:m} = 2,92$	$2,8575374 \cdot 10^{-2}$	$1,432983 \cdot 10^{-3}$	$4,5012536 \cdot 10^{-2}$	$2,3686372 \cdot 10^{-2}$
δk_i , $P = 0,9$	1,2938%	0,06345%	1,98819%	1,0189659%
$\Delta k_{f.i}$, $P = 0,9$	$2,8356066 \cdot 10^{-2}$	$1,432444 \cdot 10^{-3}$	$4,5543382 \cdot 10^{-2}$	$2,3543207 \cdot 10^{-2}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,1916 \pm 2,8356 \cdot 10^{-2}$ (2,1632-2,2199)	$2,2577 \pm 1,432 \cdot 10^{-4}$ (2,2563-2,2591)	$2,2907 \pm 4,554 \cdot 10^{-4}$ (2,2452-2,3362)	$2,3105 \pm 2,354 \cdot 10^{-2}$ (2,2870-2,3340)

Таблиця Е.37 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.\max.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.\max.f}$, твердість породи 1440 МПа

β , кН·с/м	0	40	70	90
Експериментальні значення $k_{T.\partial.\max.i}$	2,2825	2,2639	2,249	2,2535
$k_{T.\partial.\max} = 2,28437 - 0,00362\sqrt{\beta}$	2,2832	2,2615	2,2541	2,2500
$\bar{k}_{T.\partial.\max.i} \equiv k_{T.\partial.\max.i}$	2,28285	2,2627	2,25155	2,25175
$\Delta k_{T.\partial.\max.i}$	$ 0,00035 $; 0,00035; 0	$ 0,0012 $; 0,0012; 0	$ 0,00255 $; 0,00255; 0	$ 0,00175 $; 0,00175; 0
$\sum \Delta k^2_{T.\partial.\max.i}$	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$	$1,3005 \cdot 10^{-5}$	$6,125 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$2,02072 \cdot 10^{-4}$	$6,9282 \cdot 10^{-4}$	$1,472243 \cdot 10^{-3}$	$1,010362 \cdot 10^{-3}$
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	$3,81917 \cdot 10^{-4}$	$1,30943 \cdot 10^{-3}$	$2,782539 \cdot 10^{-3}$	$1,909586 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,8$	0,02%	0,06%	0,12%	0,0848%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,8$	$3,81975 \cdot 10^{-4}$	$1,308735 \cdot 10^{-3}$	$2,78569 \cdot 10^{-3}$	$1,908101 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.\max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,2832 \pm 3,82 \cdot 10^{-4}$ (2,2836-2,2828)	$2,2615 \pm 1,309 \cdot 10^{-3}$ (2,2628-2,2602)	$2,2541 \pm 2,7857 \cdot 10^{-3}$ (2,2569-2,2513)	$2,25 \pm 1,9081 \cdot 10^{-3}$ (2,2519-2,2481)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	$5,90051 \cdot 10^{-4}$	$2,023035 \cdot 10^{-3}$	$4,29895 \cdot 10^{-3}$	$2,950259 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,9$	0,0258%	0,089%	0,1909%	0,131%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,9$	$5,9014244 \cdot 10^{-4}$	$2,021962 \cdot 10^{-3}$	$4,303818 \cdot 10^{-3}$	$2,947967 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.\max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,2832 \pm 5,90 \cdot 10^{-4}$ (2,3422-2,2242)	$2,2615 \pm 2,022 \cdot 10^{-3}$ (2,2635-2,2595)	$2,2584 \pm 4,3038 \cdot 10^{-3}$ (2,2569-2,2498)	$2,25 \pm 2,948 \cdot 10^{-3}$ (2,2529-2,2470)

Таблиця Е.38 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.\max.f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.\max.f}$, твердість породи 2050 МПа

β , кН·с/м	0	40	70	90
Експериментальні значення $k_{T.\partial.\max.i}$	2,3169	2,2821	2,2431	2,2187
$k_{T.\partial.\max} = 2,32051 \cdot e^{-0,000485 \cdot \beta}$	2,3204	2,2759	2,24305	2,2214
$\bar{k}_{T.\partial.\max.i} \equiv k_{T.\partial.\max.i}$	2,31865	2,279	2,243075	2,22005
$\Delta k_{T.\partial.\max.i}$	$ 0,00175 $; 0,00175; 0	$ 0,0031 $; 0,0031; 0	$ 0,000025 $; 0,000025; 0	$ 0,00135 $; 0,00135; 0
$\sum \Delta k^2_{T.\partial.\max.i}$	$6,125 \cdot 10^{-6}$	$1,922 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$3,645 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$1,010362 \cdot 10^{-3}$	$1,789785 \cdot 10^{-3}$	$1,4433 \cdot 10^{-5}$	$7,79422 \cdot 10^{-4}$
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	$1,909586 \cdot 10^{-3}$	$3,382695 \cdot 10^{-3}$	$2,7279 \cdot 10^{-5}$	$1,473109 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,8$	0,0824%	0,1484%	0,001216%	0,0663%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,8$	$1,911027 \cdot 10^{-3}$	$3,378093 \cdot 10^{-3}$	$2,7279 \cdot 10^{-5}$	$1,474005 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.\max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,3204 \pm 1,911 \cdot 10^{-3}$ (2,3223-2,3185)	$2,2759 \pm 3,378 \cdot 10^{-3}$ (2,2793-2,2725)	$2,24305 \pm 2,73 \cdot 10^{-5}$ (2,2431-2,2430)	$2,2214 \pm 1,474 \cdot 10^{-3}$ (2,2229-2,2199)
$B\Pi_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	$2,950259 \cdot 10^{-3}$	$5,226174 \cdot 10^{-3}$	$4,2146 \cdot 10^{-5}$	$2,275914 \cdot 10^{-3}$
$\delta k_i, P = 0,9$	0,127%	0,2293%	0,001879%	0,1025%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,9$	$2,952486 \cdot 10^{-3}$	$5,219065 \cdot 10^{-3}$	$4,5754 \cdot 10^{-5}$	$2,277298 \cdot 10^{-3}$
$k_{T.\partial.\max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,3204 \pm 2,952 \cdot 10^{-3}$ (2,3234-2,3174)	$2,2759 \pm 5,219 \cdot 10^{-3}$ (2,2811-2,2707)	$2,24305 \pm 4,58 \cdot 10^{-5}$ (2,2431-2,2430)	$2,2214 \pm 2,277 \cdot 10^{-3}$ (2,2237-2,2191)

Таблиця Е.39 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.max.f}$, твердість породи 1440 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $k_{T.\partial.max.i}$	2,3487	2,5493	2,2315	1,9238
$k_{T.\partial.max.f} = 2,3057662 + 0,0003323 \cdot C - 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$	2,4071	2,4451	2,300	1,9015
$\bar{k}_{T.\partial.max.i} \equiv k_{T.\partial.max.i}$	2,3779	2,4972	2,26575	1,91265
$\Delta k_{T.\partial.max.i}$	$ 0,0292 $; 0,0292; 0	$ 0,0521 $; 0,0521; 0	$ 0,03425 $; 0,03425; 0	$ 0,01115 $; 0,01115; 0
$\sum \Delta k^2_{T.\partial.max.i}$	$1,70528 \cdot 10^{-3}$	$5,42882 \cdot 10^{-3}$	$2,346125 \cdot 10^{-3}$	$2,48645 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	$1,68586 \cdot 10^{-2}$	$3,00799 \cdot 10^{-2}$	$1,97742 \cdot 10^{-2}$	$6,43746 \cdot 10^{-3}$
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	$3,18628 \cdot 10^{-2}$	$5,68511 \cdot 10^{-2}$	$3,73733 \cdot 10^{-2}$	$1,216679 \cdot 10^{-2}$
$\delta k_i, P = 0,8$	1,34%	2,2766%	1,65%	0,636%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,8$	$3,225407 \cdot 10^{-2}$	$5,56649 \cdot 10^{-2}$	$3,79383 \cdot 10^{-2}$	$1,20959 \cdot 10^{-2}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,4071 \pm 3,225 \cdot 10^{-2}$ (2,4394-2,3748)	$2,4451 \pm 5,57 \cdot 10^{-2}$ (2,5008-2,3894)	$2,30 \pm 3,794 \cdot 10^{-2}$ (2,3379-2,2621)	$1,9015 \pm 1,21 \cdot 10^{-2}$ (1,9136-1,8894)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	$4,92272 \cdot 10^{-2}$	$8,7833451 \cdot 10^{-2}$	$5,77408 \cdot 10^{-2}$	$1,879737 \cdot 10^{-2}$
$\delta k_i, P = 0,9$	2,0702%	3,517%	2,5484%	0,982791941%
$\Delta k_{f.i}, P = 0,9$	$4,983169 \cdot 10^{-2}$	$8,6000949 \cdot 10^{-2}$	$5,8613633 \cdot 10^{-2}$	$1,8687788 \cdot 10^{-2}$
$k_{T.\partial.max.f.i} \pm \Delta k_{f.i}$	$2,4071 \pm 4,983 \cdot 10^{-2}$ (2,3573-2,4569)	$2,4451 \pm 8,60 \cdot 10^{-2}$ (2,3591-2,5311)	$2,30 \pm 5,861 \cdot 10^{-2}$ (2,3586-2,2414)	$1,9015 \pm 1,87 \cdot 10^{-2}$ (1,9202-1,8828)

За рівнянням частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = 2,3057662 + 0,0003323 \cdot C - 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C^2$ локальний максимум зафіксований для жорсткості

$$0 = 0,0003323 - 2 \cdot 1,9761 \cdot 10^{-7} \cdot C \rightarrow C = 841 \text{ кН / м. } k_{T.\partial.max.f_{max}} = 2,4455.$$

90% довірчий інтервал для значення 2,4455, наближено, приймаємо рівним довірчому інтервалу лоя рівня жорсткості 800 кН/м: $2,4455 \pm 8,60 \cdot 10^{-2}$ (2,3595-2,5315).

Таблиця Е.40 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $k_{T.\partial.max.f}$, твердість породи 2050 МПа

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $k_{T.\partial.max.i}$	2,2234	2,5669	2,1736	2,1675
$k_{T.\partial.max} = 1,2373168 + 0,0034588 \cdot C - 2,72196 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 5,94907 \cdot 10^{-10} \cdot C^3$	$2,223397 \approx$ 2,2234	$2,5668947 \approx$ 2,5669	$2,17359 \approx$ 2,1736	$2,16749 \approx$ 2,1675

Емпірична частинна залежність $k_{T.\partial.max.f} = f(C)$ для породи твердості 2050 МПа, апроксимована поліномом третього степеня,

$$k_{T.\partial.max} = 1,2373168 + 0,0034588 \cdot C - 2,72196 \cdot 10^{-6} \cdot C^2 + 5,94907 \cdot 10^{-10} \cdot C^3,$$

за яким точкове значення 2,5814 локального максимуму, одержане для жорсткості 925 кН/м. За цими рівнянням основна похибка практично відсутня, і становить $\sigma_0 = 1,1 \cdot 10^{-14}$. Значення експериментальних даних і значення, обчислені за поліномом третього ступеня, практично співпадають, тобто між цими значеннями випадкова похибка відсутня.

Таблиця Е.41 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 1440 МПа

$n_{\bar{\theta}}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	133,27	149,12	151,94	157,37
$2A_{T,f,i} = -2575,3952/n + 166,39223$	134,98	147,03	152,69	157,36
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	134,125	140,075	152,315	157,365
$\Delta 2A_{T,i} = 2\bar{A}_{T,i} - 2A_{T,i}$	$ 0,855 ;$ 0,855; 0	$ 1,045 ;$ 1,045; 0	$ 0,375 ;$ 0,375; 0	$ 0,005 ;$ 0,005; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	1,46205	2,18405	0,28125	0,00005
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,4936345	0,60333	0,216506	0,002887
$B\Pi_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 1,89$	0,9329692	1,140296	0,409197	0,005456
$\delta 2A_{T,i} = \frac{B\Pi_i}{2\bar{A}_{T,i}} \cdot 100\%$	0,70%	0,814%	0,27%	0,00347%
$\Delta 2A_{T,f,i} = \frac{2A_{T,f,i} \cdot \delta 2A_{T,i}}{100}$	0,9389165	1,196913577	0,4102	0,00546
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	134,98±0,94 (134,04-135,92)	147,03±1,197 (145,83-148,23)	152,69±0,41 (152,28-153,10)	157,36±0,005 (157,36-157,35)
$B\Pi_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 2,92$	1,441412682	1,7617266	0,632198	0,00843
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	1,07467%	1,258%	0,415%	0,00536%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	1,450601	1,8492	0,6338	0,00843
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	134,98±1,45 (133,53-136,43)	147,03±1,197 (145,18-148,88)	152,69±0,6338 (152,06-153,32)	157,36±0,0084 (157,37-157,35)

Таблиця Е.42 – Значення $B\Pi_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(n)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 2050 Па

$n_{\bar{\theta}}, \text{хв}^{-1}$	82	133	188	285
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	133,24	137,76	143,71	141,17
$2A_{T,f,i} = n / (0,00689 \cdot n + 0,042)$	135,1	138,78	140,58	142,1
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	134,17	138,27	142,145	141,635
$\Delta 2A_{T,i}$	$ 0,93 ;$ 0,93; 0	$ 0,51 ;$ 0,51; 0	$ 1,565 ;$ 1,565; 0	$ 0,465 ;$ 0,465; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	1,7298	0,5202	4,89845	0,43245
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,53693575	0,294449	0,903553	0,2684679
$B\Pi_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 1,89$	1,014808	0,55651	1,707715	0,507404
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,8$	0,756%	0,40%	1,20%	0,358%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,8$	1,02184	0,55856	1,6889	0,50907
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	135,1±1,02 (136,12-134,08)	138,78±0,56 (138,22-139,34)	140,58±1,69 (138,89-142,27)	142,1±0,51 (141,59-142,61)
$B\Pi_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 2,92$	1,56785	0,85979	2,63838	0,783926
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	1,168%	0,6218%	1,856%	0,553%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	1,5787	0,86296	2,609327	0,78581
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	135,1±1,5787 (133,52-136,68)	138,78±0,863 (137,92-139,64)	140,58±2,609 (137,97-143,19)	142,1±0,786 (142,88-141,31)

Таблиця Е.43 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 1440 Па

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	115,59	140,66	152,61	182,85
$2A_{T,f,i} = 87,63235 \cdot e^{0,029148F}$	117,29	135,69	156,98	181,61
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	116,44	138,175	154,795	182,23
$\Delta 2A_{T,i}$	$ 0,85 $; 0,85; 0	$ 2,485 $; 2,485; 0	$ 2,185 $; 2,185; 0	$ 0,62 $; 0,62; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	1,445	12,35045	9,54845	0,7688
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,490748	1,434715	1,261503	0,357957
$ВП_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 1,89$	0,9275132	2,711612	2,3842545	0,676539
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,8$	0,80%	1,96%	1,54%	0,37%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,8$	0,9343	2,6628	2,417909	0,674237
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	117,29±0,93 (118,22-116,36)	135,69±2,66 (133,03-138,33)	156,98±2,42 (154,56-159,40)	181,61±0,67 (180,94-182,28)
$ВП_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 2,92$	1,432983	4,189369	3,683610	1,045235
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	1,2307%	3,0319%	2,3797%	0,5734%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	1,443444	4,114026	3,7356	1,041679
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	117,29±1,443 (115,85-118,73)	135,69±4,11 (131,16-139,80)	156,98±3,74 (153,24-160,72)	181,61±1,04 (180,57-182,65)

Таблиця Е.44 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(F)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 2040 Па

F_{CT} , кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	105,84	125,06	148,58	176,4
$2A_{T,f,i} = 75,1486 \cdot e^{0,034096F}$	105,68	125,32	148,62	176,24
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	105,76	125,19	148,6	176,32
$\Delta 2A_{T,i}$	$ 0,08 $; 0,08; 0	$ 0,13 $; 0,13; 0	$ 0,02 $; 0,02; 0	$ 0,08 $; 0,08; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,0128	0,0338	0,0008	0,0128
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,046188	0,075055	0,011547	0,046188
$ВП_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 1,89$	0,087295	0,141855	0,021824	0,087295
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,8$	0,0825%	0,11%	0,0147%	0,0495%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,8$	0,08723	0,14200	0,021827	0,08726
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	105,68±0,09 (105,59-105,77)	125,32±0,14 (125,18-125,46)	148,62±0,022 (148,60-148,64)	176,24±0,09 (176,15-176,33)
$ВП_i = t_{P;m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P;m} = 2,92$	0,13487	0,219162	0,0337172	0,134869
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	0,1275%	0,1751%	0,02269%	0,07649%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	0,134767	0,21939	0,0337218	0,134808
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	105,68±0,13 (105,54-105,81)	125,32±0,22 (125,1-125,53)	148,62±0,034 (148,59-148,65)	176,24±0,13 (176,02-176,38)

Таблиця Е.45 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T.f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T.f}$, твердість породи 1440 Па

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $2A_{T.i}$	146,13	149,18	157,21	139,20
$2A_{T.f.i} = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$	144,35	152,37	155,21	140,05
$2\bar{A}_{T.i} \equiv 2A_{T.i}$	145,24	150,775	156,21	139,625
$\Delta 2A_{T.i}$	$\begin{vmatrix} 0,89 \\ 0,89; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1,595 \\ 1,595; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1,0 \\ 1,0; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,425 \\ 0,425; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A_{T.i}^2$	1,5842	5,08805	2,0	0,36125
$\sigma_{B.i} = \sqrt{D_{B.i}}$	0,5138417	0,920974	0,5773503	0,245374
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 1,89$	0,9711609	1,740451	1,091192	0,463757
$\delta 2A_{T.i}, P = 0,8$	0,6687%	1,154%	0,698%	0,33%
$\Delta 2A_{T.f.i}, P = 0,8$	0,9652098	1,75886	1,084066	0,465168
$2A_{T.f.i} \pm \Delta 2A_{T.i}$	144,35 $\pm$ 0,96 (143,38-145,32)	152,37 $\pm$ 1,76 (150,61-154,13)	155,21 $\pm$ 1,08 (154,12-156,29)	140,05 $\pm$ 0,46 (139,58-140,52)
$ВП_i = t_{P.m} \cdot \sigma_{B.i}, t_{P.m} = 2,92$	1,5004179	2,68895	1,685863	0,716492
$\delta 2A_{T.i}, P = 0,9$	1,03306%	1,783%	1,07923%	0,5132%
$\Delta 2A_{T.f.i}, P = 0,9$	1,491224	2,717396	1,67507	0,718672
$2A_{T.f.i} \pm \Delta 2A_{T.i}$	144,35 $\pm$ 1,49 (142,96-145,84)	152,37 $\pm$ 2,72 (149,65-155,09)	155,21 $\pm$ 1,67 (153,53-156,88)	140,05 $\pm$ 0,72 (139,33-140,77)

За рівнянням частинної залежності $2A_{T.f.i} = 132,1721611 + 0,0356541 \cdot C - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot C^2$ локальний максимум зафіксований для жорсткості $C = 1371 \text{ кН / м}$. $2A_{T.max} = 156,62 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

80% довірчий інтервал для значення 156,62 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta 2A_{T.f} = 1,75886$; при $C = 1700 - \Delta 2A_{T.f} = 1,084066$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta 2A'_{T.f} = 1,75886 - 1,084066 = 0,674794$. За цим на $1 \text{ кН / м} = 0,674794 / 900 = 7,49771 \cdot 10^{-4}$. За різницею $1371 - 800 = 571$ одержимо $\Delta 2A_{T.f} - \Delta 2A'_{T.f} \cdot 571 = 1,75886 - 7,49771 \cdot 10^{-4} \cdot 571 = 1,3307$.

80% довірчий інтервал для значення $156,62 \pm 1,3307 = 155,29 - 157,95$.

90% довірчий інтервал для значення 156,62 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta 2A_{T.f} = 2,7174$; при $C = 1700 - \Delta 2A_{T.f} = 1,67507$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta 2A'_{T.f} = 2,7174 - 1,67507 = 1,04233$. За цим на $1 \text{ кН / м} = 1,04233 / 900 = 1,1581 \cdot 10^{-3}$. За різницею $1371 - 800 = 571$ одержимо $\Delta 2A_{T.f} - \Delta 2A'_{T.f} \cdot 571 = 2,7174 - 1,1581 \cdot 10^{-3} \cdot 571 = 2,0561$.

90% довірчий інтервал для значення $156,62 \pm 2,0561 = 154,56 - 158,68$.

Таблиця Е.46 – Значення BP_i для частинної залежності $2A_{T,f} = f(C)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 2050 Па

C , кН/м	400	800	1700	2500
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	140,55	143,32	138,67	133,33
$2A_T = 139,6507439 +$ $+ 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$	141,32	141,95	139,57	133,04
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	140,935	142,635	139,12	133,185
$\Delta 2A_{T,i}$	$ 0,385 $; 0,385; 0	$ 0,685 $; 0,685; 0	$ 0,45 $; 0,45; 0	$ 0,145 $; 0,145; 0
$\sum \Delta 2A_{T,i}^2$	0,29645	0,93845	0,405	0,04205
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,2222798	0,395485	0,259808	0,083716
$BP_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{P:m} = 1,89$	0,4201089	0,7474665	0,4910364	0,158228
$\delta 2A_{T,i}$, $P = 0,8$	0,298%	0,524%	0,353%	0,1188%
$\Delta 2A_{T,f,i}$, $P = 0,8$	0,4212566	0,743877	0,4926247	0,15805
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	141,32 $\pm$ 0,42 (140,90-141,74)	141,95 $\pm$ 0,74 (141,21-142,69)	139,57 $\pm$ 0,49 (139,08-140,06)	133,04 $\pm$ 0,16 (132,88-133,20)
$BP_i = t_{P:m} \cdot \sigma_{B,i}$, $t_{P:m} = 2,92$	0,64906	1,154816	0,758638	0,244450
$\delta 2A_{T,i}$, $P = 0,9$	0,4605%	0,8096%	0,5453%	0,1835%
$\Delta 2A_{T,f,i}$, $P = 0,9$	0,65083	1,14927	0,761092	0,244184
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	141,32 $\pm$ 0,65 (140,67-141,97)	141,95 $\pm$ 1,149 (140,8-143,1)	139,57 $\pm$ 0,76 (138,81-140,33)	133,04 $\pm$ 0,24 (132,8-133,28)

За рівнянням частинної залежності $2A_T = 139,6507439 + 0,0054684 \cdot C - 3,24572 \cdot 10^{-6} \cdot C^2$ локальний максимум зафіксований для жорсткості $C = 842 \text{ кН / м}$. $2A_{T,max} = 141,98 \approx 142 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

80% довірчий інтервал для значення 156,62 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta 2A_{T,f} = 0,743877$; при $C = 1700 - \Delta 2A_{T,f} = 0,4926247$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta 2A'_{T,f} = 0,743877 - 0,4926247 = 0,2512523$. За цим на $1 \text{ кН / м} = 0,2512523 / 900 = 2,79169 \cdot 10^{-4}$. За різницею $842 - 800 = 42$ одержимо $\Delta 2A_{T,f} - \Delta 2A'_{T,f} \cdot 571 = 0,743877 - 2,79169 \cdot 10^{-4} \cdot 42 = 0,732152$.

80% довірчий інтервал для значення $142 \pm 0,732152 = 141,27 - 142,73$.

90% довірчий інтервал для значення 156,62 визначаємо методом лінійної інтерполяції.

При $C = 800 - \Delta 2A_{T,f} = 1,14927$; при $C = 1700 - \Delta 2A_{T,f} = 0,761092$. Інтервалу жорсткості $1700 - 800 = 900$ відповідає інтервал $\Delta 2A'_{T,f} = 1,14927 - 0,761092 = 0,388178$. За цим на $1 \text{ кН / м} = 0,388178 / 900 = 4,31308 \cdot 10^{-4}$. За різницею $842 - 800 = 42$ одержимо $\Delta 2A_{T,f} - \Delta 2A'_{T,f} \cdot 571 = 1,14927 - 4,31308 \cdot 10^{-4} \cdot 42 = 1,1488387$.

90% довірчий інтервал для значення $142 \pm 1,1488387 = 140,85 - 143,1$.

Таблиця Е.47 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 1440 Па

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	152,53	151,8	144,46	142,43
$2A_{T,f,i} = -0,11713 \cdot \beta + 153,78956$	153,78	149,10	145,59	143,25
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	153,155	150,45	145,025	142,84
$\Delta 2A_{T,i}$	$\begin{vmatrix} 0,625 \\ 0,625; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1,35 \\ 1,35; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,565 \\ 0,565; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,41 \\ 0,41; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A^2_{T,i}$	0,78125	3,645	0,63845	0,3362
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,3608439	0,779423	0,326203	0,236714
$ВП_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 1,89$	0,681995	1,473109	0,616523	0,447389
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,8$	0,44%	0,98%	0,42%	0,31%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,8$	0,68478	1,45989	0,61892	0,448673
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	153,78±0,68 (154,46-153,10)	149,10±1,46 (150,56-147,64)	145,59±0,62 (146,21-144,97)	143,25±0,45 (143,70-142,80)
$ВП_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 2,92$	1,0536642	2,275915	0,9525125	0,6912%
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	0,68797%	1,5127%	0,656792	0,4839%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	1,057964	2,25549	0,956223	0,693188
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	153,78±1,06 (154,84-152,72)	149,10±2,26 (151,36-146,84)	145,59±0,96 (146,54-144,63)	143,25±0,69 (143,94-142,56)

Таблиця Е.48 – Значення $ВП_i$ для частинної залежності $2A_{T,f} = f(\beta)$ і довірчі інтервали для значень $2A_{T,f}$, твердість породи 2050 Па

β , кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $2A_{T,i}$	142,18	141,77	136,07	135,85
$2A_{T,f,i} = -0,08082 \cdot \beta + 143,01068$	143,0	139,78	137,35	135,74
$2\bar{A}_{T,i} \equiv 2A_{T,i}$	142,59	140,775	136,71	135,795
$\Delta 2A_{T,i}$	$\begin{vmatrix} 0,41 \\ 0,41; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,995 \\ 0,995; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,64 \\ 0,64; 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0,055 \\ 0,055; 0 \end{vmatrix}$
$\sum \Delta 2A^2_{T,i}$	0,3362	1,98005	0,8192	0,00605
$\sigma_{B,i} = \sqrt{D_{B,i}}$	0,2367136	0,574464	0,369504	0,0317543
$ВП_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 1,89$	0,4473887	1,08576	0,6983629	0,060016
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,8$	0,31%	0,77%	0,51%	0,04%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,8$	0,448676	1,078062	0,70163	0,05999
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	143,0±0,45 (143,45-142,55)	139,78±1,08 (140,86-138,70)	137,35±0,70 (138,05-136,65)	135,74±0,06 (135,80-135,68)
$ВП_i = t_{P,m} \cdot \sigma_{B,i}, t_{P,m} = 2,92$	0,6912037	1,677433	1,078952	0,092722
$\delta 2A_{T,i}, P = 0,9$	0,48475%	1,19157%	0,7892%	0,06828%
$\Delta 2A_{T,f,i}, P = 0,9$	0,693191	1,66558	1,084003	0,092685
$2A_{T,f,i} \pm \Delta 2A_{T,i}$	143,0±0,69 (143,69-142,31)	139,78±1,67 (141,45-138,11)	137,43±1,08 (138,43-136,27)	135,74±0,093 (135,83-135,65)

Додаток Є

Методика обробки результатів планового експерименту в загальному виді і приклад методики обробки результатів факторного експерименту, проведеного за греко-латинським квадратом 4x4.

В табл. Є.1 наведено заповнений композиційний квадрат факторного експерименту, розробленого на основі греко-латинського квадрата 4x4, а в табл. 2.3 матриця цього композиційного квадрата.

Таблиця Є.1 – Комбінаційний квадрат планованого експерименту, розробленого на основі греко-латинського квадрата 4x4

B		B1				B2				B3				B4			
A	D	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
	C																
1	C1	Y1															
	C2								Y2								
	C3										Y3						
	C4															Y4	
2	C1																Y8
	C2									Y7							
	C3							Y6									
	C4		Y5														
3	C1						Y10										
	C2			Y9													
	C3													Y12			
	C4												Y11				
4	C1											Y15					
	C2														Y16		
	C3				Y13												
	C4					Y14											

У табл. Є.2 подано результати експерименту, усереднені відповідно за параметрами A та B.

Таблиця Є.2 – Матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4x4

№досл.	A	B	C	D	Y
1	A1	B1	C1	D1	Y1
2		B2	C2	D4	Y2
3		B3	C3	D2	Y3
4		B4	C4	D3	Y4
5	A2	B1	C4	D2	Y5
6		B2	C3	D3	Y6
7		B3	C2	D1	Y7
8		B4	C1	D4	Y8
9	A3	B1	C2	D3	Y9
10		B2	C1	D2	Y10
11		B3	C4	D4	Y11
12		B4	C3	D1	Y12
13	A4	B1	C3	D4	Y13
14		B2	C4	D1	Y14
15		B3	C1	D3	Y15
16		B4	C2	D2	Y16

Таблиця Є.3 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів A і B

$B \backslash A$	$A1, J=1$	$A2, J=2$	$A3, J=3$	$A4, J=4$	Сума	Середнє
$B1$ $J=1$	$Y1$	$Y5$	$Y9$	$Y13$	$\sum_{j=1}^4 Y_{B1,A,j}$	$\bar{Y}_{B1}$
$B2$ $J=2$	$Y2$	$Y6$	$Y10$	$Y14$	$\sum_{j=1}^4 Y_{B2,A,j}$	$\bar{Y}_{B2}$
$B3$ $J=3$	$Y3$	$Y7$	$Y11$	$Y15$	$\sum_{j=1}^4 Y_{B3,A,j}$	$\bar{Y}_{B3}$
$B4$ $J=4$	$Y4$	$Y8$	$Y12$	$Y16$	$\sum_{j=1}^4 Y_{B4,A,j}$	$\bar{Y}_{B4}$
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{A1,B,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{A2,B,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{A3,B,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{A4,B,j}$	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A,j,B,j} =$ $= \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{B,j,A,j}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{B,j}$
Середнє	$\bar{Y}_{A1}$	$\bar{Y}_{A2}$	$\bar{Y}_{A3}$	$\bar{Y}_{A4}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{A,j}$	

Таблиця Є.4 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів C і D

CD	$D1, J=1$	$D2, J=2$	$D3, J=3$	$D4, J=4$	Сума	Середнє
$C1$ $J=1$	$Y1$	$Y10$	$Y15$	$Y8$	$\sum_{j=1}^4 Y_{C1,D,j}$	$\bar{Y}_{C1}$
$C2$ $J=2$	$Y7$	$Y16$	$Y9$	$Y2$	$\sum_{j=1}^4 Y_{C2,D,j}$	$\bar{Y}_{C2}$
$C3$ $J=3$	$Y12$	$Y3$	$Y6$	$Y13$	$\sum_{j=1}^4 Y_{C3,D,j}$	$\bar{Y}_{C3}$
$C4$ $J=4$	$Y14$	$Y5$	$Y4$	$Y11$	$\sum_{j=1}^4 Y_{C4,D,j}$	$\bar{Y}_{C4}$
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{D1,C,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{D2,C,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{D3,C,j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{D4,C,j}$	$\sum_{C=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{C,j,D,j} =$ $= \sum_{D=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{D,j,C,j}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{C,j}$
Середнє	$\bar{Y}_{D1}$	$\bar{Y}_{D2}$	$\bar{Y}_{D3}$	$\bar{Y}_{D4}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{D,j}$	

У табл. Є.3 і Є.4 подано результати експерименту, усереднені відповідно за параметрами A і B та C і D .

Позначення у табл. Є.3 і Є.4: $j = \overline{1,4}$: $\sum_{j=1}^4 Y_{A1.B.j}$ – сума значень функції Y для першого рівня фактора A , одержаних для чотирьох рівнів фактора B ;

$\bar{Y}_{A1} = \frac{\sum_{j=1}^4 Y_{A1.B.j}}{4}$ – середнє значення функції Y для першого рівня фактора A ;

$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A.j.B.j} = \sum_{j=1}^4 Y_{A1.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A2.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A3.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A4.B.j}$ – сумарне значення функції Y за всіма рівнями фактора A ;

$\sum_{j=1}^4 Y_{B1.A.j}$ – сума значень функції Y для першого рівня фактора B , одержаних для чотирьох

рівнів фактора A ; $\bar{Y}_{B1} = \frac{\sum_{j=1}^4 Y_{B1.A.j}}{4}$ – середнє значення функції Y для першого рівня фактора B ;

$\sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{B.j.A.j} = \sum_{j=1}^4 Y_{B1.A.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{B2.A.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{B3.A.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{B4.A.j}$ – сумарне значення функції Y за всіма рівнями фактора B .

Позначення у табл.Є.4, віднесені до факторів C і D , за змістом ідентичні позначенням у табл.Є.3.

Згідно даних табл.Є.3 і Є.4 за значеннями $\bar{Y}_{A1}, \bar{Y}_{A2}, \bar{Y}_{A3}, \bar{Y}_{A4}$ (за програмою App.1) підбирається емпірична залежність $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$, за значеннями $\bar{Y}_{B1}, \bar{Y}_{B2}, \bar{Y}_{B3}, \bar{Y}_{B4}$ підбирається емпірична залежність $\bar{Y}_{B.f} = f(B)$, за значеннями $\bar{Y}_{C1}, \bar{Y}_{C2}, \bar{Y}_{C3}, \bar{Y}_{C4}$ підбирається емпірична залежність $\bar{Y}_{C.f} = f(C)$ і за значеннями $\bar{Y}_{D1}, \bar{Y}_{D2}, \bar{Y}_{D3}, \bar{Y}_{D4}$ підбирається емпірична залежність $\bar{Y}_{D.f} = f(D)$ Якщо програмою App.1 не можна підібрати частинну емпіричну залежність, то використовується програма “NUMERI”, розроблена проф. Шрюфером, кафедра ЕІТ ТУ, Мюнхен, 1990, за якою апроксимація експериментальних даних здійснюється поліномом другого або третього степеня.

Результати підбору емпіричних частинних залежностей і перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних подано в табл.Є.5.

Таблиця Є.5 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{S}}$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}$
A	$Y_{A.j.f} = f(A_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{A}}$	
B	$Y_{B.j.f} = f(B_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{B}}$	
C	$Y_{C.j.f} = f(C_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{C}}$	
D	$Y_{D.j.f} = f(D_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_{\bar{D}}$	

В табл.Є.5 $\bar{Y}_{\bar{S}}$ – середнє функції $\bar{Y}$ за експериментальними значеннями одного із зовнішніх незалежних чинників A, B, C і D , σ_0 – основна похибка апроксимації.

Якщо за табл.Є.5 для всіх частинних емпіричних залежностей умови задовільної апроксимації експериментальних даних підтверджені, слід переходити до останнього етапу методики – створення багатофакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції.

Якщо хоча б для одного чинника умови апроксимації не підтверджені, перейти до другого етапу методики.

Другий етап. Нейтралізація впливу незалежних чинників за методом Протодьяконова

Другий етап починається з нейтралізації впливу найбільш потужного незалежного чинника, який визначається за відношенням $Y_{\max} / Y_{\min}$ (див. табл.Є.5) за умови задовільної апроксимації експериментальних даних рівнянням частинної емпіричної залежності, підбраної для цього чинника. За методом Протодьяконова одержані значення $Y_{CK.1.i}$, за якими формується нова матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4×4 (див. табл.Є.6).

Таблиця Є.6 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.1.i}$, одержані за методом Протодьяконова

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i + (Y_{\bar{A}} - Y_{A.f.j})$	$Y_{CK.1.i}$

Таблиця Є.7 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту, усереднених за значеннями параметрів A і B

$B \backslash A$	$A1, J=1$	$A2, J=2$	$A3, J=3$	$A4, J=4$	Сума	Середнє
$B1$ $J=1$	$Y_{CK.1.1}$	$Y_{CK.1.5}$	$Y_{CK.1.9}$	$Y_{CK.1.13}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.B1.A.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.B1}$
$B2$ $J=2$	$Y_{CK.1.2}$	$Y_{CK.1.6}$	$Y_{CK.1.10}$	$Y_{CK.1.14}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.B2.A.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.B2}$
$B3$ $J=3$	$Y_{CK.1.3}$	$Y_{CK.1.7}$	$Y_{CK.1.11}$	$Y_{CK.1.15}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.B3.A.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.B3}$
$B4$ $J=4$	$Y_{CK.1.4}$	$Y_{CK.1.8}$	$Y_{CK.1.12}$	$Y_{CK.1.16}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.B4.A.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.B4}$
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A1.B.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A2.B.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A3.B.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A4.B.j}$	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A.j.B.j} = \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.B.j.A.j}$	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{CK.1.B.j}$
Середнє	$\bar{Y}_{CK.1.A1}$	$\bar{Y}_{CK.1.A2}$	$\bar{Y}_{CK.1.A3}$	$\bar{Y}_{CK.1.A4}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{CK.1.A.j}$	

Пояснення до табл.: $\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A.j.B.j} = \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A1.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A2.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A3.B.j} + \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.A4.B.j}$

– сумарна величина скорегованих значень функції $Y_{CK.1}$ для чотирьох рівнів параметрів A і B .

Скореговані значення $Y_{CK.1.i}$, усереднені за параметрами A і B , наводяться в табл.Є.7, а за параметрами C і D , табл.Є.8.

Таблиця Є.8 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту, усереднених за значеннями параметрів C і D

$C \backslash D$	$D1, J=1$	$D2, J=2$	$D3, J=3$	$D4, J=4$	Сума	Середнє
$C1$ $J=1$	$Y_{CK.1.1}$	$Y_{CK.1.10}$	$Y_{CK.1.15}$	$Y_{CK.1.8}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.C.1.D.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.C.1}$
$C2$ $J=2$	$Y_{CK.1.7}$	$Y_{CK.1.16}$	$Y_{CK.1.19}$	$Y_{CK.1.8}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.C.2.D.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.C.2}$
$C3$ $J=3$	$Y_{CK.1.12}$	$Y_{CK.1.3}$	$Y_{CK.6}$	$Y_{CK.1.13}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.C.3.D.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.C.3}$
$C4$ $J=4$	$Y_{CK.1.14}$	$Y_{CK.1.5}$	$Y_{CK.1.4}$	$Y_{CK.1.11}$	$\sum_{i=1}^4 Y_{CK.1.C.4.D.j}$	$\bar{Y}_{CK.1.C.4}$
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.D.1.C.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.D.2.C.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.D.3.C.j}$	$\sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.D.4.C.j}$	$\sum_{C=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.D.j.C.j} = \sum_{D=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{CK.1.C.j.D.j}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{CK.1.C.j}$
Середнє	$\bar{Y}_{CK.1.D.1}$	$\bar{Y}_{CK.1.D.2}$	$\bar{Y}_{CK.1.D.3}$	$\bar{Y}_{CK.1.D.4}$	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{CK.1.D.j}$	

Згідно даних табл.Є.7 і Є.8 за значеннями $\bar{Y}_{CK.1.A1}, \bar{Y}_{CK.1.A2}, \bar{Y}_{CK.1.A3}, \bar{Y}_{CK.1.A4}$ (за програмою App.1) підбирається емпірична залежність $\bar{Y}_{CK.1.A.f} = f(A)$. Аналогічно підбираються залежності $\bar{Y}_{CK.1.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{CK.1.C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{CK.1.D.f} = f(D)$. Результати підбору емпіричних частинних залежностей і перевірка умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних наводяться в табл. Є.10.

За цими результатами рішення про задовільну нейтралізацію одного з факторів експерименту приймається дослідниками за ознаками, які вони обирають самостійно, оскільки загальноприйнятих критеріїв оцінки нейтралізації на сьогоднішній день не має. Такими ознаками задовільної нейтралізації, при аналізі проведених досліджень, було прийнято коефіцієнт зменшення відношення $Y_{\max} / Y_{\min}$ мінімум в 1,5рази і величину довірчої ймовірності меншу за 0,5.

Таблиця Є.9 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_S$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}$
A	$Y_{CK.1.A.j.f} = f(A_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_A$	
B	$Y_{CK.1.B.j.f} = f(B_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_B$	
C	$Y_{CK.1.C.j.f} = f(C_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_C$	
D	$Y_{CK.1.D.j.f} = f(D_j)$	r_B $P_{\min} < P_D < P_{\max}$	$\sigma_0 < 0,1 \bar{Y}_D$	

Якщо за результатами нейтралізації найбільш впливового фактору на функцію Y , для трьох інших факторів результати апроксимації задовільні, то переходити до останнього етапу методики – створення багатофакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції. Якщо хоча б для одного чинника умови апроксимації не підтверджені, то за наведеною вище методикою, нейтралізується вплив найбільш потужного, з трьох інших факторів. Скореговані значення вхідних даних позначаються $Y_{CK.2}$.

Якщо при нейтралізації цього фактора хоча б для одного з двох інших умови апроксимації не підтверджені, то за наведеною вище методикою, нейтралізується вплив найбільш потужного, з двох останніх чинників. Скореговані значення вхідних даних позначаються $Y_{CK.3}$. Якщо і цьому випадку не вдалось підібрати задовільну апроксимуючу залежність для всіх чотирьох чинників, то потрібно перейти до третього етапу методики.

Третій етап. Нейтралізація впливу незалежних чинників за методом Яремійчука-Райхерта

Третій етап починається з нейтралізації впливу найбільш потужного незалежного чинника, який визначається за відношенням $\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}$ (див. табл.Є.5) за умови задовільної апроксимації експериментальних даних рівнянням частинної емпіричної залежності, підбраної для цього чинника.

Для вибраного фактору S , де S один із зовнішніх незалежних чинників A , B , C або D , визначається середнє значення вибірки чотирьох прийнятих рівнів його зміни $\bar{S}$, наприклад для

фактору A – $\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^4 A_j}{4} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4}$. За рівнянням емпіричної залежності $Y_{S.f} = f(S)$ і за значенням $\bar{S}$ визначається значення функції $Y_{\bar{S}}$. Перший варіант скорегованих вхідних даних визначається за формулою $Y_{CK.4.i} = Y_i \cdot \frac{Y_{\bar{S}}}{Y_{S.f.j}}$ $i = \overline{1,16}, j = \overline{1,4}$.

$$Y_{CK.4.i} = Y_i \cdot \frac{Y_{\bar{S}}}{Y_{S.f.j}} \quad i = \overline{1,16}, j = \overline{1,4}.$$

За значеннями $Y_{CK.4.i}$ формується нова матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4×4 , табл.Є.10.

Таблиця Є.10 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.4.i}$ одержані за методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i \cdot \frac{Y_{\bar{A}}}{Y_{A.f.j}}$	$Y_{CK.4.i}$

Методика нейтралізації незалежних чинників експерименту за методом Яремійчука-Райхерта аналогічна методиці нейтралізації цих же чинників за методом Протодьяконова.

Якщо за третім етапом не вдалось підібрати задовільну апроксимуючу залежність для всіх чотирьох чинників, то потрібно перейти до четвертого етапу методики.

Четвертий етап. Підбір частинних емпіричних залежностей прологарифмованими експериментальними даними

Багатофакторну емпіричну модель нелінійної кореляції $Y_M = f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$, шляхом логарифмування можна представити як суму логарифмів функцій

$\lg Y_M = \lg f(A) + \lg f(B) + \lg f(C) + \lg f(D)$. За методикою, наведеною в [23], доказано, що якщо логарифми усереднюються по будь якому рівню незалежного зовнішнього чинника, то вплив інших зовнішніх незалежних чинників залишається незмінним при переході від одного до іншого рівня аналізованого чинника, тобто всі зміни усереднених логарифмів результатів експерименту $\lg Y_E$ будуть залежати тільки зміни аналізованого чинника. Такий же результат буде одержаний при усередненні логарифмів результатів експерименту на всіх рівнях незалежних зовнішніх чинників.

Таблиця Є.11 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту,
усереднених за значеннями параметрів A і B

$B \setminus A$	$A1, J=1$	$A2, J=2$	$A3, J=3$	$A4, J=4$	Сума lg	Середнє lg	Антилогарифм
$B1$ $J=1$	$lg Y1$	$lg Y5$	$lg Y9$	$lg Y13$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{B1, A, j}$	$lg \bar{Y}_{B1}$	$Alg \bar{Y}_{B1}$
$B2$ $J=2$	$lg Y2$	$lg Y6$	$lg Y10$	$lg Y14$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{B2, A, j}$	$lg \bar{Y}_{B2}$	$Alg \bar{Y}_{B2}$
$B3$ $J=3$	$lg Y3$	$lg Y7$	$lg Y11$	$lg Y15$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{B3, A, j}$	$lg \bar{Y}_{B3}$	$Alg \bar{Y}_{B3}$
$B4$ $J=4$	$lg Y4$	$lg Y8$	$lg Y12$	$lg Y16$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{B4, A, j}$	$lg \bar{Y}_{B4}$	$Alg \bar{Y}_{B4}$
Сума lg	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{A1, B, j}$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{A2, B, j}$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{A3, B, j}$	$\sum_{j=1}^4 lg Y_{A4, B, j}$	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 lg Y_{A, j, B, j} =$ $= \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 lg Y_{B, j, A, j}$	$\sum_{j=1}^4 lg \bar{Y}_{B, j}$	$\sum_{j=1}^4 Alg \bar{Y}_{B, j}$
Середнє lg	$lg \bar{Y}_{A1}$	$lg \bar{Y}_{A2}$	$lg \bar{Y}_{A3}$	$lg \bar{Y}_{A4}$	$\sum_{j=1}^4 lg \bar{Y}_{A, j}$		
Антилогарифм	$Alg \bar{Y}_{A1}$	$Alg \bar{Y}_{A2}$	$Alg \bar{Y}_{A3}$	$Alg \bar{Y}_{A4}$	$\sum_{j=1}^4 Alg \bar{Y}_{A, j}$		

Пояснення до табл.: $\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 lg Y_{A, j, B, j} = \sum_{j=1}^4 lg Y_{A1, B, j} + \sum_{j=1}^4 lg Y_{A2, B, j} + \sum_{j=1}^4 lg Y_{A3, B, j} + \sum_{j=1}^4 lg Y_{A4, B, j}$ – сумарна величина прологарифмованих значень функції Y_E для чотирьох рівнів параметра A .

Таблиця Є.12 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту, усереднених за значеннями параметрів C і D

CD	$D1, J=1$	$D2, J=2$	$D3, J=3$	$D4, J=4$	Сума lg	Середнє lg	Антилогарифм
$C1$ $J=1$	$lgY1$	$lgY10$	$lgY15$	$lgY8$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{C1, D, j}$	$lg\bar{Y}_{C1}$	$Alg\bar{Y}_{C1}$
$C2$ $J=2$	$lgY7$	$lgY16$	$lgY9$	$lgY2$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{C2, D, j}$	$lg\bar{Y}_{C2}$	$Alg\bar{Y}_{C2}$
$C3$ $J=3$	$lgY12$	$lgY3$	$lgY6$	$lgY13$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{C3, D, j}$	$lg\bar{Y}_{C3}$	$Alg\bar{Y}_{C3}$
$C4$ $J=4$	$lgY14$	$lgY5$	$lgY4$	$lgY11$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{C4, D, j}$	$lg\bar{Y}_{C4}$	$Alg\bar{Y}_{C4}$
Сума lg	$\sum_{j=1}^4 lgY_{D1, C, j}$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{D2, C, j}$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{D3, C, j}$	$\sum_{j=1}^4 lgY_{D4, C, j}$	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 lgY_{D, j, C, j} =$ $= \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 lgY_{C, j, D, j}$	$\sum_{j=1}^4 lg\bar{Y}_{C, j}$	$\sum_{j=1}^4 Alg\bar{Y}_{C, j}$
Середнє lg	$lg\bar{Y}_{D1}$	$lg\bar{Y}_{D2}$	$lg\bar{Y}_{D3}$	$lg\bar{Y}_{D4}$	$\sum_{j=1}^4 lg\bar{Y}_{D, j}$		
Антилогарифм	$Alg\bar{Y}_{D1}$	$Alg\bar{Y}_{D2}$	$Alg\bar{Y}_{D3}$	$Alg\bar{Y}_{D4}$	$\sum_{j=1}^4 Alg\bar{Y}_{D, j}$		

За середнім значенням результатів експерименту $\lg \bar{Y}_E$, яке визначається на кожному рівні незалежних зовнішніх чинників $\lg \bar{Y}_{A1}, \dots, \lg \bar{Y}_{A4}, \lg \bar{Y}_{B1}, \dots, \lg \bar{Y}_{B4}, \lg \bar{Y}_{C1}, \dots, \lg \bar{Y}_{C4}$ і $\lg \bar{Y}_{D1}, \dots, \lg \bar{Y}_{D4}$, визначається його антилогарифм. Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту за значеннями незалежних зовнішніх факторів A, B, C і D наведені в табл.Є.11 і Є.12.

За значеннями $A \lg \bar{Y}_{A1}, \dots, A \lg \bar{Y}_{A4}, A \lg \bar{Y}_{B1}, \dots, A \lg \bar{Y}_{B4}, A \lg \bar{Y}_{C1}, \dots, A \lg \bar{Y}_{C4}$ і $A \lg \bar{Y}_{D1}, \dots, A \lg \bar{Y}_{D4}$, за програмами App.1 і “NUMERI” підбирається такий вид емпіричної залежності, за якою апроксимація вибірок значень антилогарифмів буде вважатися задовільною. Результати підбору емпіричних залежностей наведено в табл.Є.13.

Таблиця Є.13 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції та інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_S$ $S=A, B, C, D$	$\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}}$
A	$Y_{Alg A.j.f} = f(A_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$	$\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_A$	
B	$Y_{Alg B.j.f} = f(B_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$	$\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_B$	
C	$Y_{Alg C.j.f} = f(C_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$	$\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_C$	
D	$Y_{Alg D.j.f} = f(D_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$	$\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_D$	

П'ятий етап. Встановлення, за частинними емпіричними залежностями (етапи 1-4) багатфакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції виду $Y_M = f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$

В табл.Є.14, Є.15 наведено всі варіанти підбору емпіричних залежностей для зовнішніх незалежних чинників. Оформлення таблиць показано на прикладі залежностей, підібраних для зовнішнього чинника A . Загальна кількість варіантів підбору рівна семи.

Найкращим варіантом підбору вважається залежність, за якою довірча ймовірність кореляційного зв'язку між залежною змінною величиною Y_i незалежним зовнішнім чинником більша за 0,95. Якщо таких залежностей декілька то приймається залежність з найбільшою величиною $\frac{0,1\bar{Y}_A}{\sigma_0}$. Прологарифмовані вхідні дані використовуються тільки в

тому випадку, коли за експериментальними і скорегованими даними хоча б для одного фактора не підібрана залежність, для якої результати апроксимації негативні.

Таблиця Є.14 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$ за методом

Протодюконова

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_A$	$\frac{0,1\bar{Y}_A}{\sigma_0}$
Експериментальні дані	$Y_{A.j.f} = f(A_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$		
Нейтралізація впливу зовнішніх чинників за методом Протодюконова				
Скореговані дані СК.1	$Y_{CK.1.A.j.f} = f(A_j)$	r_B $r_B P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$		
Скореговані дані СК.2	$Y_{CK.2.A.j.f} = f(A_j)$	"-"		
Скореговані дані СК.3	$Y_{CK.3.A.j.f} = f(A_j)$	"-"		

Таблиця Є.15 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$ за методом

Яремійчука-Райхерта

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_A$	$\frac{0, I\bar{Y}_A}{\sigma_0}$
Експериментальні дані	$Y_{A,j,f} = f(A_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$		
Нейтралізація впливу зовнішніх чинників за методом Яремійчука-Райхерта				
Скореговані дані СК.4	$Y_{CK.4.A,j,f} = f(A_j)$	r_B $P_{MIN} < P_D < P_{MAX}$		
Скореговані дані СК.5	$Y_{CK.5.A,j,f} = f(A_j)$	"-"		
Скореговані дані СК.6	$Y_{CK.6.A,j,f} = f(A_j)$	"-"		
Прологарифмовані дані	$Y_{Alg A,j,f} = f(A_j)$	"-"		

В табл.Є.16 наведений найкращий варіант, із загальних семи, емпіричних залежностей для всіх зовнішніх незалежних чинників.

Багатофакторна модель у вигляді добутку буде мати вигляд

$$Y_{M,i} = \bar{B} \cdot f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)$$

У формулі моделі $\bar{B}$ – середнє значення постійної складової B_i , де $i = \overline{1,16}$ – порядковий номер досліду експерименту, $j = \overline{1,4}$ – порядковий номер рівня незалежного фактору.

Таблиця Є.16 – Усереднені експериментальні та скореговані значення функції Y і значення, визначені за кращими емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей

$$\bar{Y}_{A,f} = f(A), \bar{Y}_{B,f} = f(B), \bar{Y}_{C,f} = f(C) \text{ і } \bar{Y}_{D,f} = f(D).$$

A_j	$A1, J=1$	$A2, J=2$	$A3, J=3$	$A4, J=4$
Експериментальні, скореговані або прологарифмовані значення $Y_{A,j}$				
Значення $\bar{Y}_{A,f,j}$ за прийнятою залежністю				
B_j	$B1, J=1$	$B2, J=2$	$B3, J=3$	$B4, J=4$
Експериментальні, скореговані або прологарифмовані значення $Y_{B,j}$				
Значення $\bar{Y}_{B,f,j}$ за прийнятою залежністю				
C_j	$C1, J=1$	$C2, J=2$	$C3, J=3$	$C4, J=4$
Експериментальні, скореговані або прологарифмовані значення $Y_{C,j}$				
Значення $\bar{Y}_{C,f,j}$ за прийнятою залежністю				
C_j	$C1, J=1$	$C2, J=2$	$C3, J=3$	$C4, J=4$
Експериментальні, скореговані або прологарифмовані значення $Y_{C,j}$				
Значення $\bar{Y}_{C,f,j}$ за прийнятою залежністю				

У табл.Є.17 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою

$$B_i = \frac{Y_i}{f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)}, \quad (\text{Є.1})$$

де Y_i – експериментальні значення функції за даними табл.Є.2, яка відповідає i -тому дослід; $f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослід, табл.Є.16.

Як приклад визначення значення B_i – $B_1 = \frac{Y_1}{f(A_1) \cdot f(B_1) \cdot f(C_1) \cdot f(D_1)}.$

Таблиця Є.17 – Значення коефіцієнта B для всіх 16-ти дослідів планованого експерименту

№експ.	1	...				16
B_i						

У табл. Є.18 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта B). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP}-\Delta$; $B_{CP}+\Delta$).

Значення Δ обчислюється за формулою

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}}. \quad (\text{Є.2})$$

У формулі (Є.2) t_{KP} – критична точка розподілу Стюдента, визначена за прийнятим рівнем значущості α та числа степенів вільності $\kappa=n-1$; n – об'єм сукупності значень коефіцієнта B_i .

Величина коефіцієнта варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma'_B}{B'_{CP}} \cdot 100\% \quad (\text{Є.3})$$

Таблиця Є.18 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	t_{KP}	Відб. зн, B	B'_{CP}	D'_B	σ'_B

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

За значенням коефіцієнта $\bar{B}$ обчислюється значення функції за формулою багатфакторної моделі $Y_{M,i}$ для кожного i -того дослід факторного експерименту.

В табл. Є.19 наведено значення функції $Y_{M,i}$, визначені за рівнянням багатфакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими і експериментальними значеннями планованого експерименту Y_i , знайдені за формулою

$$ВП\% = \frac{Y_i - Y_{M,i}}{Y_i} \cdot 100. \quad (\text{Є.3})$$

Таблиця Є.19 – Експериментальні значення функції $Y_{E,i}$ і значення $Y_{M,i}$, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_{M,i}$	ВП%
1							
.....							
i							

Приклад методики обробки результатів факторного експерименту, проведеного за греко-латинським квадратом 4x4.

Таблиця П.1 – Приклад заповненого комбінаційного квадрата за результатами планованого експерименту, розробленого на основі греко-латинського квадрата 4×4

B		B1=10				B2=15				B3=20				B4=25			
A	D	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
	C	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500	400	800	1700	2500
A1=82	C1 0,1	Y1 0,7439															
	C2 40								Y2 0,975								
	C3 70										Y3 2,113						
	C4 90															Y4 2,675	
A2=133	C1 0,1																Y8 5,895
	C2 40									Y7 5,9675							
	C3 70							Y6 5,4009									
	C4 90		Y5 3,3686														
A3=188	C1 0,1						Y10 18,6954										

Продовження табл. П.1

A4=285	C2 40		Y9 14,7959													
	C3 70												Y12 19,5022			
	C4 90											Y11 20,6856				
	C1 0,1									Y15 39,6878						
	C2 40													Y16 58,4906		
	C3 70				Y13 27,5384											
	C4 90					Y14 25,1398										

Таблиця П.2 – Матриця композиційного квадрата факторного експерименту 4х4

№досл.	A	B	C	D	Y
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132
4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856
12		B4 25	C3 70	D1 400	Y12 19,5022
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906

Таблиця П.3 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів A і B

B\A	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1 10	Y1 0,7439	Y5 3,3686	Y9 14,7959	Y13 27,5384	$\sum_{j=1}^4 Y_{B1,A,j} = 46,4468$	$\bar{Y}_{B1}$ 11,6117
B2 15	Y2 0,9755	Y6 5,4009	Y10 18,6954	Y14 25,1398	$\sum_{j=1}^4 Y_{B2,A,j} = 50,2116$	$\bar{Y}_{B2}$ 12,5529
B3 20	Y3 2,1132	Y7 5,9675	Y11 20,6856	Y15 39,6878	$\sum_{j=1}^4 Y_{B3,A,j} = 68,4541$	$\bar{Y}_{B3}$ 17,1135
B4 25	Y4 2,6751	Y8 5,895	Y12 19,5022	Y16 58,4906	$\sum_{j=1}^4 Y_{B4,A,j} = 86,5629$	$\bar{Y}_{B4}$ 21,6407
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{A1,B,j}$ 6,5077	$\sum_{j=1}^4 Y_{A2,B,j}$ 20,632	$\sum_{j=1}^4 Y_{A3,B,j}$ 73,6791	$\sum_{j=1}^4 Y_{A4,B,j}$ 150,8566	$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A,j,B,j} = \sum_{B=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{B,j,A,j}$ 251,6754	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{B,i}$ 62,91885
Середнє	$\bar{Y}_{A1}$ 1,6269	$\bar{Y}_{A2}$ 5,158	$\bar{Y}_{A3}$ 18,4198	$\bar{Y}_{A4}$ 37,7142	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{A,i} = 62,91885$	

Таблиця П.4 – Результати експерименту, усереднені за значеннями параметрів С і D

C\D	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1 0,1	Y1 0,7439	Y10 18,6954	Y15 39,6878	Y8 5,895	$\sum_{j=1}^4 Y_{C1,D,j} = 65,0221$	$\bar{Y}_{C1}$ 16,2555
C2 40	Y7 5,9675	Y16 58,4906	Y9 14,7959	Y2 0,9755	$\sum_{j=1}^4 Y_{C2,D,j} = 80,2295$	$\bar{Y}_{C2}$ 20,0574
C3 70	Y12 19,5022	Y3 2,1132	Y6 5,4009	Y13 27,5384	$\sum_{j=1}^4 Y_{C3,D,j} = 54,5547$	$\bar{Y}_{C3}$ 13,6387
C4 90	Y14 25,1398	Y5 3,3686	Y4 2,6751	Y11 20,6856	$\sum_{j=1}^4 Y_{C4,D,j} = 51,8691$	$\bar{Y}_{C4}$ 12,9673
Сума	$\sum_{j=1}^4 Y_{D1,C,j}$ 51,3534	$\sum_{j=1}^4 Y_{D2,C,j}$ 82,6678	$\sum_{j=1}^4 Y_{D3,C,j}$ 62,5597	$\sum_{j=1}^4 Y_{D4,C,j}$ 55,0945	$\sum_{C=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{C,j,D,j} = \sum_{D=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{D,j,C,j}$ 251,6754	$\sum_{j=1}^4 \bar{Y}_{C,j}$ 62,91885
Середнє	$\bar{Y}_{D1}$ 12,8384	$\bar{Y}_{D2}$ 20,6670	$\bar{Y}_{D3}$ 15,6399	$\bar{Y}_{D4}$ 13,7736	$\sum_{i=1}^4 \bar{Y}_{D,i}$ 62,91885	

Позначення у табл.3: j – номер рівня незалежного фактора, $j=1\dots 4$: $\sum_{j=1}^4 Y_{A1,B,j}$ – сума значень функції Y для першого рівня фактора А, одержаних для чотирьох рівнів фактора В;

$\bar{Y}_{A1} = \frac{\sum_{j=1}^4 Y_{A1,B,j}}{4}$ – середнє значення функції Y для першого рівня фактора А;

$\sum_{A=1}^4 \sum_{j=1}^4 Y_{A,j,B,j} = \sum_{j=1}^4 Y_{A1,B,j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A2,B,j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A3,B,j} + \sum_{j=1}^4 Y_{A4,B,j}$ – сумарне значення функції Y за всіма рівнями фактора А.

Таблиця П.5 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_{\bar{S}}$ S=A, B, C, D	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A _j	32	133	188	285	0,9777 0,95<P<0,98	1,555<1,573	23,14
	$\bar{Y}_{A,j}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142			
	$\bar{Y}_{A,f,j} = \left(-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j}\right)^2$							
B	B _j	10	15	20	25	0,9821 0,98<P<0,99	0,063<1,57	1,86
	$\bar{Y}_{B,j}$	11,6117	12,5529	17,1135	21,6407			
	$\bar{Y}_{B,f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$							
C	C _j	0,1	40	70	90	0,6175	2,67>1,57	1,55
	$\bar{Y}_{C,j}$	16,2555	20,0574	13,6387	12,9673	0,6<P<0,7		
	$\bar{Y}_{C,j} = 18,1783098 \cdot C_j^{0,99681}$							
	$\bar{Y}_{C,f,j} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C_j - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C_j^2$					0,46 0,3<P<0,4	1,64>1,57	
D	D _j	400	800	1700	2500	0,6423	2,68>1,57	1,61
	$\bar{Y}_{D,j}$	12,8384	20,6670	15,6399	13,7736	0,5<P<0,6		
	$\bar{Y}_{D,f,j} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D_j - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

За даними табл.П.3 і П.4, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C,f} = f(C)$, $\bar{Y}_{D,f} = f(D)$.

У табл.П.5 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C,f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{D,f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального. Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{A,f} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A})^2$

A _j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A,f,j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
Екс.значення $\bar{Y}_{A,j}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142
$\bar{Y}_A = (\bar{Y}_{A1} + \bar{Y}_{A2} + \bar{Y}_{A3} + \bar{Y}_{A4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{A,f,j} - \bar{Y}_{A,j})^2$	0,21187609	4,09536169	2,94740224	0,00660969

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum(\bar{Y}_{A,f,j} - \bar{Y}_{A,j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7,25464}{4-1}} = 1,555 < 1,57.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{A,j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum(\bar{Y}_{A,j} - \bar{Y}_A)^2 / n} = \sqrt{\frac{(1,6269 - 15,7297)^2 + (5,158 - 15,7297)^2 + (18,4198 - 15,7297)^2 + (37,7142 - 15,7297)^2}{4}} = 14,1528.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y,f}$ за значеннями емпіричної залежності $\bar{Y}_{A,f}$

$$\sigma_{y,f} = \sqrt{\sum(\bar{Y}_{A,f,j} - \bar{Y}_A)^2 / n} = \sqrt{\frac{(1,1666 - 15,7297)^2 + (7,1817 - 15,7297)^2 + (16,703 - 15,7297)^2 + (37,6329 - 15,7297)^2}{4}} = 13,834.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y,f}}{\sigma_y} = 13,834 / 14,1528 = 0,9777.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9777 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9777^2}} = 6,58 > T_{KP} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Довірча ймовірність існування кореляційного зв'язку між величинами A і Y знаходиться в інтервалі $0,95 < P < 0,98$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{C,f} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C^2$

C _j	0,1	40	70	90
$\bar{Y}_{C,f,j}$ за формулою	16,6164	18,5583	15,7962	11,9607
Екс.значення $\bar{Y}_{C,j}$	16,2555	20,0574	13,6387	12,9673
$\bar{Y}_C = (\bar{Y}_{C1} + \bar{Y}_{C2} + \bar{Y}_{C3} + \bar{Y}_{C4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{C,f,j} - \bar{Y}_{C,j})^2$	0,13024881	2,24730081	4,65480625	1,01324356

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum(\bar{Y}_{C,f,j} - \bar{Y}_{C,j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{8,0456}{4-1}} = 1,637 \approx 1,64.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{C,j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum(\bar{Y}_{C,j} - \bar{Y}_C)^2 / n} = \sqrt{\frac{(16,2555 - 15,7297)^2 + (20,0574 - 15,7297)^2 + (13,6387 - 15,7297)^2 + (12,9673 - 15,7297)^2}{4}} = 7,7521.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{c.f.j} - \bar{Y}_{\bar{c}})^2 / n} = \sqrt{\left[\frac{(16,6164 - 15,7297)^2 + (18,5583 - 15,7297)^2 + (15,7962 - 15,7297)^2 + (11,9607 - 15,7297)^2}{4} \right]} = 2,3978.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,3978 / 7,7521 = 0,3093.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,3093 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,3093^2}} = 0,46 \triangleright T_{KP} = 0,44 \rightarrow P = 0,3.$$

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{D,f} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D _j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{D,f,j}$ за формулою	14,7814	17,2001	17,9068	13,0307
Екс.значення $\bar{Y}_{D,j}$	12,8384	20,6670	15,6399	13,7736
$\bar{Y}_{\bar{D}} = (\bar{Y}_{D1} + \bar{Y}_{D2} + \bar{Y}_{D3} + \bar{Y}_{D4}) / 4 = 62,9189 / 4 = 15,7297$				
$(\bar{Y}_{D,f,j} - \bar{Y}_{D,j})^2$	3,775249	12,01939561	5,13883561	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{D,f,j} - \bar{Y}_{D,j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48538}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за експериментальними значеннями $\bar{Y}_{D,j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{D,j} - \bar{Y}_{\bar{D}})^2 / n} = \sqrt{\left[\frac{(12,8384 - 15,7297)^2 + (20,667 - 15,7297)^2 + (15,6399 - 15,7297)^2 + (13,7736 - 15,7297)^2}{4} \right]} = 3,0237.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{D,f,j} - \bar{Y}_{\bar{D}})^2 / n} = \sqrt{\left[\frac{(14,7814 - 15,7297)^2 + (17,2001 - 15,7297)^2 + (17,9068 - 15,7297)^2 + (13,0307 - 15,7297)^2}{4} \right]} = 1,9420.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,942 / 3,0237 = 0,6423.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6423 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6423^2}} = 1,185 \triangleright T_{KP} = 1,061 \rightarrow P = 0,5.$$

За табл.5 умови задовільної апроксимації виконуються тільки для двох залежностей $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$, і $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$. З врахуванням цього переходимо до другого етапу методики створення багатфакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції.

Другий етап. Послідовна нейтралізація впливу зовнішніх чинників величину Y за методом Протоцьконова.

З усіх факторів А, В, С і D впливу на процес зміни величини Y фактор А, за відношенням $\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$ найпотужніший. При його нейтралізації визначається середнє значення:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^4 A_j}{4} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4 = (82 + 133 + 188 + 285) / 4 = 172, \text{ і за цим значенням і}$$

залежністю $\bar{Y}_{A.f} = f(A_j)$ обчислюється значення функції:

$$\bar{Y}_{A.f} = \left(-4,768 + 0,6458123\sqrt{172} \right)^2 = 13,7029.$$

Скореговані вхідні дані визначаються за формулою $Y_{CK.I.i} = Y_i + (\bar{Y}_{A.f} - \bar{Y}_{A.f.j}), i = 1...16, j = 1...4.$

Результати обчислення за цією формулою зведено в таблицю

A_j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A.f.j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
$\bar{Y}_{A.f} - \bar{Y}_{A.f.j}$	13,7029-1,1666= =12,5363	13,7029-7,1817= =6,5212	13,7029-16,703= =-3,0001	13,7029-37,6329= =-23,93

Для дослідів 1-4 скореговані значення рівні $Y_{CK.I.(1...4)} = Y_{E.(1...4)} + 12,5363. i = 1...4; j = 1.$
 Для дослідів 5-8 скореговані значення рівні $Y_{CK.I.(5...8)} = Y_{E.(5...8)} + 6,5212. i = 5...8; j = 2.$ Для дослідів 9-12 скореговані значення рівні $Y_{CK.I.(9...12)} = Y_{E.(9...12)} - 3,0001. i = 9...12; j = 3.$ Для дослідів 13-16 скореговані значення рівні $Y_{CK.I.(13...16)} = Y_{E.(13...16)} - 23,93. i = 13...16; j = 4.$

Таблиця П.6 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.I.i}$, одержані за методом

Протодьяконова

№дос.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i + (\bar{Y}_{A.f} - \bar{Y}_{A.f.j})$	$Y_{CK.I.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439	0,7439+12,5363	13,2802
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755	0,9755+12,5363	13,5118
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132	2,1132+12,5363	14,6495
4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751	2,6751+12,5363	15,2114
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686	3,3686+6,5212	9,8898
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009	5,4009+6,5212	11,9221
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675	5,9675+6,5212	12,4887
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895	5,895+6,5212	12,4162
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959	14,7959-3,0001	11,7958
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954	18,6954-3,0001	15,6953
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856	20,6856-3,0001	17,6855
12		B4 25	C3 70	D1 400	Y12 19,5022	19,5022-3,0001	16,5021
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384	27,5384-23,93	3,6084
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398	25,1398-23,93	1,2084
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878	39,6878-23,93	15,7578
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906	58,4906-23,93	34,5606

Таблиця П.7 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.I.i}$ за

значеннями параметрів А і В

B\A	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1	13,2802	9,8898	11,7958	3,6084	38,5742	9,6436
B2	13,5118	11,9221	15,6953	1,2084	42,3376	10,5844
B3	14,6495	12,4887	17,6855	15,7578	60,5815	15,1454
B4	15,2114	12,4162	16,5021	34,5606	78,6903	19,6726
Сума	56,6529	46,7168	61,6787	55,1352	220,1836	55,046
Середнє	14,1632	11,6792	15,4197	13,7838	55,0459	

Таблиця П.8 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.I.i}$ за

значеннями параметрів С і D

C\D	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	13,2802	15,6953	15,7578	12,4162	57,1495	14,2874
C2	12,4887	34,5606	11,7958	13,5118	72,3569	18,0892
C3	16,5021	14,6495	11,9221	3,6084	46,6821	11,6705
C4	1,2084	9,8898	15,2114	17,6855	43,9951	10,9988
Сума	43,4794	74,7952	54,6871	47,2219	220,1836	
Середнє	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055		

За даними табл.П.7 і П.8, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей

$$\bar{Y}_{CK.I.A.f} = f(A), \bar{Y}_{CK.I.B.f} = f(B), \bar{Y}_{CK.I.C.f} = f(C) \text{ і } \bar{Y}_{CK.I.D.f} = f(D).$$

У табл.П.9 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{CK.I.A.f} = f(A), \bar{Y}_{CK.I.B.f} = f(B), \bar{Y}_{CK.I.C.f} = f(C) \text{ і } \bar{Y}_{CK.I.D.f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального.

Таблиця П.9 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Задовільний апроксимативний експериментальний даних								
Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}_{Ck,l}}$ S=A, B, C, D	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,16	1,53>1,38	1,32
	$\bar{Y}_{CK.I.A.j}$	14,1632	11,6792	15,4197	13,7838	0,1<P<0,2		
	$\bar{Y}_{CK.I.A.f.j} = 11,4426 + 0,0355 \ln A_j$					Вплив А нейтралізовано		
B	B_i	10	15	20	25	0,9691	0,54<1,38	2,04
	$\bar{Y}_{CK.I.B.j}$	9,6436	10,5844	15,1454	19,6726	0,95<P<0,98		
	$\bar{Y}_{CK.I.B.f.j} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B_j^3$							
C	C_i	0,1	40	70	90	0,59	2,06>1,38	1,64
	$\bar{Y}_{CK.I.C.j}$	14,2874	18,0892	11,6705	10,9988	0,5<P<0,6		
	$\bar{Y}_{CK.I.C.f.j} = 14,703 - 7,424781 \cdot 10^{-6} \cdot C_j^3$							
D	D_i	400	800	1700	2500	0,6402	2,68>1,38	1,72
	$\bar{Y}_{CK.I.D.j}$	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055	0,5<P<0,6		
	$\bar{Y}_{3K.I.D.f.j} = 9,09847912 + 0,0109042 \cdot D_j - 4,04747 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.I.D.f} = 9,0984897 + 0,0109046 \cdot D - 4,04758 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_J	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{3K.I.D.f,j}$ за формулою	12,8127	15,2317	15,9388	11,0626
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.I.D.j}$	10,86985	18,6988	13,6718	11,8055
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.I}} = (\bar{Y}_{D1_{CK.I}} + \bar{Y}_{D2_{CK.I}} + \bar{Y}_{D3_{CK.I}} + \bar{Y}_{D4_{CK.I}}) / 4 = 55,04595 / 4 = 13,7615$				
$(\bar{Y}_{CK.I.D.f,j} - \bar{Y}_{CK.I.D.j})^2$	3,77486041	12,02078241	5,139289	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.I.D.f,i} - \bar{Y}_{CK.I.D,i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48683}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.I.D,i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.I}} - \bar{Y}_{CK.I.D,j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(10,8698 - 13,7615)^2 + (18,6988 - 13,7615)^2 + (13,6718 - 13,7615)^2 + (11,8055 - 13,7615)^2}{4}} = 3,0238.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y,f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y,f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{3K.I.D.f,j} - \bar{Y}_{\bar{D}_{CK.I}})^2 / n} = \sqrt{\frac{(12,8127 - 13,7615)^2 + (15,2317 - 13,7615)^2 + (15,9388 - 13,7615)^2 + (11,0626 - 13,7615)^2}{4}} = 1,9421.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y,f}}{\sigma_y} = 1,9421 / 3,0238 = 0,6423.$$

$$T_{CP} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6423 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6423^2}} = 1,185 > T_{KP} = 1,061 \rightarrow P = 0,5.$$

Наступним фактором, який потрібно нейтралізувати - фактор В. Умови апроксимації першого варіанту скорегованих даних залежністю $\bar{Y}_{CK.I.B.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B^3$ підтверджені, для факторів С і D ці умови не підтверджені. Середнє значення фактора $\bar{B} = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4 = (10 + 15 + 20 + 25) / 4 = 17,5$. За цим значенням і формулою $\bar{Y}_{CK.I.\bar{B}.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot 17,5^3 = 12,5937$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.I.B.f} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B^3$

B_J	10	15	20	25
$\bar{Y}_{CK.I.B.f,j}$ за формулою	9,4924	11,1820	14,4722	19,8967
$\bar{Y}_{CK.I.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.I.B.f,j}$	12,5937-9,4924= =3,1013	12,5937-11,1820= =1,4117	12,5937-14,4722= =-1,8785	12,5937-19,8967= =-7,303

Другий варіант скорегованих вхідних даних визначаються за формулою $Y_{CK,2,i} = Y_{CK,1,i} + (\bar{Y}_{CK.I.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.I.B.f,j})$, $i = 1 \dots 16$, $j = 1 \dots 4$. Для дослідів 1, 5, 9 і 13 скореговані значення рівні $Y_{CK,2,(1,5,9,13)} = Y_{CK,1,(1,5,9,13)} + 3,1013$, $i = 1,5,9,13$; $j = 1$. Для дослідів 2, 6, 10 і 14 скореговані значення рівні $Y_{CK,2,(2,6,10,14)} = Y_{CK,1,(2,6,10,14)} + 1,4117$, $i = 1,6,10,14$; $j = 2$. Для дослідів 3, 7, 11 і 15 скореговані значення рівні $Y_{CK,2,(3,7,11,15)} = Y_{CK,1,(3,7,11,15)} - 1,8785$, $i = 3,7,11,15$; $j = 3$. Для дослідів 4, 8, 12 і 16 скореговані значення рівні $Y_{CK,2,(4,8,12,16)} = Y_{CK,1,(4,8,12,16)} - 7,303$, $i = 4,8,12,16$; $j = 4$.

Таблиця П.10 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.2i}$, одержані за методом

Протождьяконова

№досл.	A	B	C	D	$Y_{CK.1i}$	$Y_{CK.1i} + (\bar{Y}_{CK.1.\bar{B}.f} - \bar{Y}_{CK.1.B.f.j})$	$Y_{CK.2i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	13,2802	13,2802+3,1013	16,3815
2		B2 15	C2 40	D4 2500	13,5118	13,5118+1,4117	14,9235
3		B3 20	C3 70	D2 800	14,6495	14,6495-1,8785	12,771
4		B4 25	C4 90	D3 1700	15,2114	15,2114-7,303	7,9084
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	9,8898	9,8898+3,1013	12,9911
6		B2 15	C3 70	D3 1700	11,9221	11,9221+1,4117	13,3338
7		B3 20	C2 40	D1 400	12,4887	12,4887-1,8785	10,6102
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	12,4162	12,4162-7,303	5,1132
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	11,7958	11,7958+3,1013	14,8971
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	15,6953	15,6953+1,4117	17,107
11		B3 20	C4 90	D4 2500	17,6855	17,6855-1,8785	15,807
12		B4 25	C3 70	D1 400	16,5021	16,5021-7,303	9,1991
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	3,6084	3,6084+3,1013	6,7097
14		B2 15	C4 90	D1 400	1,2084	1,2084+1,4117	2,6201
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	15,7578	15,7578-1,8785	13,8793
16		B4 25	C2 40	D2 800	34,5606	34,5606-7,303	27,2576

Таблиця П.11 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.2i}$ за значеннями параметрів A і B

B\A	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1	16,3815	12,9911	14,8971	6,7097	50,9794	12,7448
B2	14,9235	13,3338	17,107	2,6201	47,9844	11,9961
B3	12,771	10,6102	15,807	13,8793	53,0675	13,2669
B4	7,9084	5,1132	9,1991	27,2576	49,4783	12,3696
Сума	51,9844	42,0483	57,0102	50,4667	201,5096	
Середнє	12,9961	10,5121	14,2526	12,6167		

Таблиця П.12 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.2i}$ за значеннями параметрів C і D

C\D	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	16,3815	17,107	13,8793	5,1132	52,481	13,1202
C2	10,6102	27,2576	14,8971	14,9235	67,5884	16,8971
C3	9,1991	12,771	13,3338	6,7097	42,0136	10,5034
C4	2,6201	12,9911	7,9084	15,807	39,3266	9,8316
Сума	38,8109	70,1267	50,0186	42,5534	201,5096	
Середнє	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384		

Таблиця П.13 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації другого варіанту скорегованих вхідних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}_{CK.2}}$ S=A, B, C, D	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A _j	82	133	188	285	0,16 0,1<P<0,2	1,53>1,26	1,36
	$\bar{Y}_{CK.2.A.j}$	12,9961	10,5121	14,2526	12,6167			
	$\bar{Y}_{CK.2.A.f.j} = 10,2030 + 0,473867 \ln A_i$					Вплив А нейтралізовано		
B	B _j	10	15	20	25	0,03 0<P<0,1	0,54<1,26	1,11
	$\bar{Y}_{CK.2.B.j}$	12,7448	11,9961	13,2669	12,3696			
	$\bar{Y}_{CK.2.B.f.j} = 0,0028 \cdot B_i + 12,54353$					Вплив В нейтралізовано		
C	C _j	0,1	40	70	90	0,59 0,5<P<0,6	2,6>1,26	1,72
	$\bar{Y}_{CK.2.C.j}$	13,1202	16,8971	10,5034	9,8316			
	$\bar{Y}_{CK.2.C.j} = -0,0482 \cdot C_i + 15,00317$							
D	D _j	400	800	1700	2500	0,6422 0,6<P<0,7	2,68>1,26	1,81
	$\bar{Y}_{CK.2.D.j}$	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384			
	$\bar{Y}_{3K.2.D.f.j} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D_j - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							
	$\bar{Y}_{CK.2...D.f.j} = -0,00085 \cdot D_j + 13,7410$					0,23 0,2<P<0,3	3,4>1,26	

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.2.D.f} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D _j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{3K.2.D.f.j}$ за формулою	11,6458	14,0646	14,7715	9,8954
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.2.D.j}$	9,7027	17,5317	12,5046	10,6384
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}} = (\bar{Y}_{D1_{CK.2}} + \bar{Y}_{D2_{CK.2}} + \bar{Y}_{D3_{CK.2}} + \bar{Y}_{D4_{CK.2}}) / 4 = 50,3774 / 4 = 12,5944$				
$(\bar{Y}_{CK.2.D.f.j} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2$	3,77486041	12,02078241	5,139289	0,55190041

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.2.D.f.j} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{21,48683}{4-1}} = 2,676 \approx 2,68.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.2.D.i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}} - \bar{Y}_{CK.2.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(9,7027 - 12,5944)^2 + (17,5317 - 12,5944)^2 + (12,5046 - 12,5944)^2 + (10,6384 - 12,5944)^2}{4}} = 3,0238.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{3K.2.D.f.j} - \bar{Y}_{\bar{D}_{CK.2}})^2 / n} = \sqrt{\frac{(11,6458 - 12,5944)^2 + (14,0646 - 12,5944)^2 + (14,7715 - 12,5944)^2 + (9,8954 - 12,5944)^2}{4}} = 1,9420.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,9421 / 3,0238 = 0,6422.$$

$$T_{CP} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,6422 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,6422^2}} = 1,185 > T_{KP} = 1,061 \rightarrow P = 0,6.$$

Підбір залежностей $\bar{Y}_{CK.2.C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{CK.2.D.f} = f(D)$, які б задовільно апроксимували вхідні дані, незадовільний. В цьому випадку переходимо до третього етапу методики.

Третій етап. Послідовна нейтралізація впливу зовнішніх чинників на величину Y за методом Яремійчука-Райхерта.

З усіх факторів A , B , C і D впливу на процес зміни величини Y фактор A , за відношенням $\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$ найпотужніший. При його нейтралізації визначається середнє значення:

$$\bar{A} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4 = (82 + 133 + 188 + 285) / 4 = 172.$$

За значенням $\bar{A}$ і залежністю $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$ обчислюється значення функції:

$$\bar{Y}_{A.f} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{172})^2 = 13,7029.$$

Скореговані вхідні дані визначаються за формулою

$$Y_{CK.3.i} = Y_i \frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}} \quad i = 1 \dots 16, \quad j = 1 \dots 4.$$

Результати обчислення за цією формулою зведено в таблицю

A_j	82	133	188	285
$\bar{Y}_{A.f.j}$ за формулою	1,1666	7,1817	16,7030	37,6329
$\frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}}$	13,7029/1,1666= =11,7460	13,7029/7,1817= =1,9080	13,7029/16,703= =0,8204	13,7029/37,6329= =0,3641

Для дослідів 1-4 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(1..4)} = Y_{E.(1..4)} \cdot 11,7029$. $i = 1 \dots 4$; $j = 1$.

Для дослідів 5-8 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(5..8)} = Y_{E.(5..8)} \cdot 1,908$. $i = 5 \dots 8$; $j = 2$.

Для дослідів 9-12 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(9..12)} = Y_{E.(9..12)} \cdot 0,8204$. $i = 9 \dots 12$; $j = 3$.

Для дослідів 13-16 скореговані значення рівні $Y_{CK.3.(13..16)} = Y_{E.(13..16)} \cdot 0,3641$. $i = 13 \dots 16$; $j = 4$.

Таблиця П.14 – Скореговані експериментальні значення $Y_{CK.3.i}$, одержані за методом

Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	Y_i	$Y_i \frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}}$	$Y_{CK.3.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	Y1 0,7439	0,7439·11,7460	8,7378
2		B2 15	C2 40	D4 2500	Y2 0,9755	0,9755·11,7460	11,4582
3		B3 20	C3 70	D2 800	Y3 2,1132	2,1132·11,7460	24,8216
4		B4 25	C4 90	D3 1700	Y4 2,6751	2,6751·11,7460	31,4217
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	Y5 3,3686	3,3686·1,9080	6,4273
6		B2 15	C3 70	D3 1700	Y6 5,4009	5,4009·1,9080	10,3049
7		B3 20	C2 40	D1 400	Y7 5,9675	5,9675·1,9080	11,3860
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	Y8 5,895	5,895·1,9080	11,2477
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	Y9 14,7959	14,7959·0,8204	12,1386
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	Y10 18,6954	18,6954·0,8204	15,3377
11		B3 20	C4 90	D4 2500	Y11 20,6856	20,6856·0,8204	16,9705
12		B4 25	C3 40	D1 400	Y12	19,5022·0,8204	15,9996

		25	70	400	19,5022		

Продовження таблиці П.14

№досл.	A	B	C	D	Y _i	$\frac{\bar{Y}_{A.f}}{\bar{Y}_{A.f.j}}$	Y _{CK.3.i}
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	Y13 27,5384	27,5384·0,3641	10,0267
14		B2 15	C4 90	D1 400	Y14 25,1398	25,1398·0,3641	9,1534
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	Y15 39,6878	39,6878·0,3641	14,4503
16		B4 25	C2 40	D2 800	Y16 58,4906	58,4906·0,3641	21,2964

Таблиця П.15 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту Y_{CK.3.i} за значеннями параметрів A і B

BA	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1	8,7378	6,4273	12,1386	10,0267	37,3304	9,3326
B2	11,4582	10,3049	15,3377	9,1534	46,2542	11,5636
B3	24,8216	11,3860	16,9705	14,4503	67,6284	16,9071
B4	31,4217	11,2477	15,9996	21,2964	79,9654	19,9914
Сума	76,4393	39,3659	60,4464	54,9268	231,1784	
Середнє	19,1098	9,8415	15,1116	13,7317		

Таблиця П.16 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту Y_{CK.3.i} за значеннями параметрів C і D

CD	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	8,7378	15,3377	14,4503	11,2477	49,7735	12,4434
C2	11,3860	21,2964	12,1386	11,4582	56,2792	14,0698
C3	15,9996	24,8216	10,3049	10,0267	61,1528	15,2882
C4	9,1534	6,4273	31,4217	16,9705	63,9729	15,9932
Сума	45,2768	67,883	68,3155	49,7031	231,1784	
Середнє	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258		

Таблиця П.17 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації скорегованих даних Y_{CK.3.i}

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}_{CK.3}}$ S=A, B, C, D	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A _j	82	133	188	285	0,42 0,4<P<0,5	3,46>1,44	1,94
	$\bar{Y}_{CK.3.A.j}$	19,1098	9,8415	15,1116	13,7317			
	$\bar{Y}_{CK.3.A.f.j} = 29,9513 - 3,072 \ln A_i$					Вплив А нейтралізовано		
B	B _j	10	15	20	25	0,9885 0,98<P<0,99	0,74<1,44	2,14
	$\bar{Y}_{CK.3.B.j}$	9,3326	11,5636	16,9071	19,9914			
	$\bar{Y}_{CK.3.B.f.j} = 0,746398 \cdot B_i + 1,38671$							
C	C _j	0,1	40	70	90	0,9997 0,999<P<1,0	0,04<1,44	1,28
	$\bar{Y}_{CK.3.C.j}$	12,4434	14,0698	15,2882	15,9932			
	$\bar{Y}_{CK.3.C.j} = 0,03974 \cdot C_i + 12,46048$							
D	D _j	400	800	1700	2500	0,9525 P≈0,95	0,92<1,44	1,51
	$\bar{Y}_{CK.3.D.j}$	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258			
	$\bar{Y}_{3K.1.D.f.j} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D_j - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.3.D.f} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$, за програмою "NUMERI": $\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} = 14,4487$ - середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.3.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.3.D.j} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2 = 2,5208904.$$

D	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.3.D.f.j}$ за формулою	11,9848	15,7833	17,8554	12,1713
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.3.D.j}$	11,3192	16,9708	17,0789	12,4258
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} = (\bar{Y}_{D1CK.3} + \bar{Y}_{D2CK.3} + \bar{Y}_{D3CK.3} + \bar{Y}_{D4CK.3}) / 4 = 57,7947 / 4 = 14,4487$				
$(\bar{Y}_{CK.3.D.j} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2$	0,4430	1,41015625	0,60295225	0,06477025

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.3.D.i} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.i})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2,52090211}{4-1}} = 0,917 \approx 0,92.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.3.D.i}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} - \bar{Y}_{CK.3.D.j})^2 / n} = \sqrt{\left[(14,4487 - 11,3192)^2 + (14,4487 - 16,9708)^2 + (14,4487 - 17,0789)^2 + (14,4487 - 12,4258)^2 \right] / 4} = 2,6060.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.3}} - \bar{Y}_{CK.3.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\left[(14,4487 - 11,9848)^2 + (14,4487 - 15,7833)^2 + (14,4487 - 17,8554)^2 + (14,4487 - 12,1713)^2 \right] / 4} = 2,4821.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,4821 / 2,606 = 0,9525.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9525 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9525^2}} = 4,424 \approx T_{KP} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Наступним, за відношенням $\frac{Y_{max}}{Y_{min}} = 2,4$, є фактор В. Середнє значення фактора

$$\bar{B} = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4 = (10 + 15 + 20 + 25) / 4 = 17,5. \text{ За цим значенням і формулою } \bar{Y}_{CK.3.\bar{B}.f} = 0,746398 \cdot 17,5 + 1,38671 = 14,4487.$$

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.3.B.f} = 0,746398 \cdot B + 1,38671$

B	10	15	20	25
$\bar{Y}_{CK.3.B.f.j}$ за формулою	8,8507	12,5827	16,3147	20,0467
$\bar{Y}_{CK.3.\bar{B}.f} / \bar{Y}_{CK.3.B.f.j}$	14,4487/8,8507= =1,6325	14,4487/12,5827= =1,1483	14,4487/16,3147= =0,8856	14,4487/20,0467= =0,7208

Скореговані вхідні дані, одержані при нейтралізації фактора В, визначаються за формулою

$$Y_{CK.4i} = Y_{CK.3i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.3.\bar{B}.f}}{\bar{Y}_{CK.3.B.f.j}}, i = 1 \dots 16, j = 1 \dots 4.$$

Для дослідів 1, 5, 9 і 13 скореговані значення рівні $Y_{CK.4.(1,5,9,13)} = Y_{CK.3.(1,5,9,13)} \cdot 1,6325. i = 1,5,9,13; j = 1$. Для дослідів 2, 6, 10 і 14 скореговані значення рівні $Y_{CK.4.(2,6,10,14)} = Y_{CK.3.(2,6,10,14)} \cdot 1,1483. i = 2,6,10,14; j = 2$. Для дослідів 3, 7, 11 і 15 скореговані значення рівні $Y_{CK.4.(3,7,11,15)} = Y_{CK.3.(3,7,11,15)} \cdot 0,8856. i = 3,7,11,15; j = 3$.

Для дослідів 4, 8, 12 і 16 скореговані значення рівні $Y_{CK.4.(4,8,12,16)} = Y_{CK.3.(4,8,12,16)} \cdot 0,7208. i = 4,8,12,16; j = 4$.

В табл.П.18 наведений четвертий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.4i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта.

Таблиця П.18 – Четвертий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.4i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	$Y_{CK.3i}$	$Y_{CK.3i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.3.B.f}}{\bar{Y}_{CK.3.B.f.j}}$	$Y_{CK.4i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	8,7378	$8,7378 \cdot 1,6325$	14,2644
2		B2 15	C2 40	D4 2500	11,4582	$11,4582 \cdot 1,1483$	13,1574
3		B3 20	C3 70	D2 800	24,8216	$24,8216 \cdot 0,8856$	21,9820
4		B4 25	C4 90	D3 1700	31,4217	$31,4217 \cdot 0,7208$	22,6488
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	6,4273	$6,4273 \cdot 1,6325$	10,4926
6		B2 15	C3 70	D3 1700	10,3049	$10,3049 \cdot 1,1483$	11,8331
7		B3 20	C2 40	D1 400	11,3860	$11,3860 \cdot 0,8856$	10,0834
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	11,2477	$11,2477 \cdot 0,7208$	8,1073
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	12,1386	$12,1386 \cdot 1,6325$	19,8163
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	15,3377	$15,3377 \cdot 1,1483$	17,6123
11		B3 20	C4 90	D4 2500	16,9705	$16,9705 \cdot 0,8856$	15,0291
12		B4 25	C3 70	D1 400	15,9996	$15,9996 \cdot 0,7208$	11,5325
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	10,0267	$10,0267 \cdot 1,6325$	16,3686
14		B2 15	C4 90	D1 400	9,1534	$9,1534 \cdot 1,1483$	10,5108
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	14,4503	$14,4503 \cdot 0,8856$	12,7972
16		B4 25	C2 40	D2 800	21,2964	$21,2964 \cdot 0,7208$	15,3504

Таблиця П.19 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.4i}$ за значеннями параметрів А і В

В\А	A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє
B1	14,2644	10,4926	19,8163	16,3686	60,9419	15,2355
B2	13,1574	11,8331	17,6123	10,5108	53,1136	13,2784
B3	21,9820	10,0834	15,0291	12,7972	59,8917	14,9729
B4	22,6488	8,1073	11,5325	15,3504	57,639	14,410
Сума	72,0526	40,5164	63,9902	55,027	231,5862	
Середнє	18,0132	10,1291	15,9976	13,7567		

Таблиця П.20 – Результати усереднення скорегованих вхідних даних експерименту $Y_{CK.4i}$ за значеннями параметрів С і D

C\D	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	14,2644	17,6123	12,7972	8,1073	52,7812	13,1953
C2	10,0834	15,3504	19,8163	13,1574	58,4075	14,6019
C3	11,5325	21,9820	11,8331	16,3686	61,7162	15,4290
C4	10,5108	10,4926	22,6488	15,0291	58,6813	14,6703
Сума	46,3911	65,4373	67,0954	52,6624	231,5862	
Середнє	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656		

Таблиця П.21 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Залежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_{\bar{S}_{CK.4}}$ $\bar{S}=A, B, C, D$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A_j	82	133	188	285	0,32 0,3<P<0,4	3,2>1,44	1,78
	$\bar{Y}_{CK.4.A.j}$	18,0132	10,1291	15,9976	13,7567			
	$\bar{Y}_{CK.4.A.f.j} = 24,9119 - 2,0683 \ln A_j$					Вплив А нейтралізовано		
B	B_j	10	15	20	25	0,18 0,1<P<0,2	0,85<1,44	1,15
	$\bar{Y}_{CK.4.B.j}$	15,2355	13,2784	14,9729	14,41			
	$\bar{Y}_{CK.4.B.f.j} = 15,6003 \cdot B_j^{-0,02719}$					Вплив В нейтралізовано		
C	C_j	0,1	40	70	90	0,9311 0,9<P<0,95	0,36<1,44	1,17
	$\bar{Y}_{CK.4.C.j}$	13,1953	14,6019	15,429	14,6703			
	$\bar{Y}_{CK.4.C.f.j} = 13,77805 \cdot C_j^{0,01882}$							
D	D_j	400	800	1700	2500	0,9554 0,95<P<0,98	0,74<1,44	1,45
	$\bar{Y}_{CK.4.D.j}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656			
	$\bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.4.D.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$, за програмою "NUMERI": $\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.4}} = 14,4741$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.4.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.4.D.j} - \bar{Y}_{CK.4.D.f.j})^2 = 1,6418679.$$

D_j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.4.D.f.j}$ за формулою	12,1349	15,4009	17,4005	12,9603
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.4.D.j}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656
$\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.4}} = (\bar{Y}_{D1CK.4} + \bar{Y}_{D2CK.4} + \bar{Y}_{D3CK.4} + \bar{Y}_{D4CK.4}) / 4 = 57,8965 / 4 = 14,4741$				
$(\bar{Y}_{CK.4.D.j} - \bar{Y}_{CK.4.D.f.j})^2$	0,28847641	0,91853056	0,39275289	0,04214809

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.4.D.j} - \bar{Y}_{CK.4.D.f.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,64190795}{4-1}} = 0,74.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.4.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{D}_{CK.4}} - \bar{Y}_{CK.4.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{[(14,4741 - 11,5978)^2 + (14,4741 - 16,3593)^2 + (14,4741 - 16,7738)^2 + (14,4741 - 13,1656)^2]}{4}} = 2,1696.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{\bar{CK.4.D}} - \bar{Y}_{CK.4.D.f.i})^2 / n} = \sqrt{\frac{[(14,4742 - 12,1349)^2 + (15,4009 - 14,4742)^2 + (14,4742 - 17,4005)^2 + (14,4742 - 12,9603)^2]}{4}} = 2,0728.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції $r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 2,0728 / 2,1696 = 0,9554$.

$$T_{\text{сп}} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9554 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,9554^2}} = 4,57 > T_{\text{кр}} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

Наступним для нейтралізації, за відношенням $\frac{Y_{max}}{Y_{min}} = 1.45$, є фактор D. Середнє значення фактора $\bar{D} = (D_1 + D_2 + D_3 + D_4) / 4 = (400 + 800 + 1700 + 2500) / 4 = 1350$. За цим значенням і формулою $\bar{Y}_{3K.4.D.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot 1350 - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot 1350^2 = 17,5030$.

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{3K.4.D.f} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$

D_s	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.4.D.f.j}$ за формулою	12,1349	15,4009	17,4005	12,9603
$\bar{Y}_{CK.4.D.f} / \bar{Y}_{CK.3.D.f.j}$	$17,503/12,1349 = 1,4424$	$17,503/15,4009 = 1,1365$	$17,503/17,4005 = 1,0059$	$17,503/12,9603 = 1,3505$

Скореговані вхідні дані, одержані при нейтралізації фактора D, визначаються за формулою $Y_{CK.5.i} = Y_{CK.4.i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.4.D.f}}{\bar{Y}_{CK.4.D.f.j}}, i = 1 \dots 16, j = 1 \dots 4$.

Для дослідів 1, 7, 12 і 14 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(1,7,12,14)} = Y_{CK.4.(1,7,12,14)} \cdot 1,4424. i = 1,7,12,14; j = 1$. Для дослідів 3, 5, 10 і 16 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(3,5,10,16)} = Y_{CK.4.(3,5,10,16)} \cdot 1,1365. i = 3,5,10,16; j = 2$. Для дослідів 4, 6, 9 і 15 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(4,6,9,15)} = Y_{CK.4.(4,6,9,15)} \cdot 1,0059. i = 4,6,9,15; j = 3$. Для дослідів 2, 8, 11 і 13 скореговані значення рівні $Y_{CK.5.(2,8,11,16)} = Y_{CK.4.(4,8,12,16)} \cdot 1,3505. i = 2,8,11,13 j = 4$.

Таблиця П.22 – П'ятий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.4.i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта

№досл.	A	B	C	D	$Y_{CK.3.i}$	$Y_{CK.4.i} \cdot \frac{\bar{Y}_{CK.4.D.f}}{\bar{Y}_{CK.4.D.f.j}}$	$Y_{CK.5.i}$
1	A1 82	B1 10	C1 0,1	D1 400	14,2644	$14,2644 \cdot 1,4424$	20,575
2		B2 15	C2 40	D4 2500	13,1574	$13,1574 \cdot 1,3505$	17,7691
3		B3 20	C3 70	D2 800	21,9820	$21,9820 \cdot 1,1365$	24,9825
4		B4 25	C4 90	D3 1700	22,6488	$22,6488 \cdot 1,0059$	22,7824
5	A2 133	B1 10	C4 90	D2 800	10,4926	$10,4926 \cdot 1,1365$	11,9248
6		B2 15	C3 70	D3 1700	11,8331	$11,8331 \cdot 1,0059$	11,9029
7		B3 20	C2 40	D1 400	10,0834	$10,0834 \cdot 1,4424$	14,5443
8		B4 25	C1 0,1	D4 2500	8,1073	$8,1073 \cdot 1,3505$	10,9489
9	A3 188	B1 10	C2 40	D3 1700	19,8163	$19,8163 \cdot 1,0059$	19,9332
10		B2 15	C1 0,1	D2 800	17,6123	$17,6123 \cdot 1,1365$	20,0163
11		B3 20	C4 90	D4 2500	15,0291	$15,0291 \cdot 1,3505$	20,2968
12		B4 25	C3 70	D1 400	11,5325	$11,5325 \cdot 1,4424$	16,6345
13	A4 285	B1 10	C3 70	D4 2500	16,3686	$16,3686 \cdot 1,3505$	22,1058
14		B2 15	C4 90	D1 400	10,5108	$10,5108 \cdot 1,4424$	15,1608
15		B3 20	C1 0,1	D3 1700	12,7972	$12,7972 \cdot 1,0059$	12,8727
16		B4 25	C2 40	D2 800	15,3504	$15,3504 \cdot 1,1365$	17,4457

В табл.П.22 наведений п'ятий варіант скорегованих вхідних даних $Y_{CK.5.i}$, одержаних при нейтралізації фактора В методом Яремійчука-Райхерта.

Таблиця П.23 –Результати п'ятого варіанту корегованих вхідних даних експерименту, усереднені за значеннями параметрів С і D

C\D	D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє
C1	20,575	20,0163	12,8727	10,9489	64,4129	16,1032
C2	14,5443	17,4457	19,9332	17,7691	69,6923	17,4231
C3	16,6345	24,9825	11,9029	22,1058	75,6257	18,9064
C4	15,1608	11,9248	22,7824	20,2968	70,1648	17,5412
Сума	66,9146	74,3693	67,4912	71,1206	279,8957	
Середнє	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802		

Таблиця П.24 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_i$	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
C	C _i	0,1	40	70	90	0,8378	0,65<1,75	1,17
	$\bar{Y}_{CK.5.C.j}$	16,1032	17,4231	18,9064	17,5412	0,8<P<0,9		
	$\bar{Y}_{CK.5.C.j} = 16,7312 \cdot C_j^{0,01695}$							
D	D _i	400	800	1700	2500	0,1224	0,86<1,75	1,11
	$\bar{Y}_{CK.5.D.j}$	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802	0<P<0,1		
	$\bar{Y}_{CK.5.D.f.j} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D_j - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D_j^2$							
	$\bar{Y}_{CK.5.D.j} = 16,09846 \cdot D_j^{0,01177}$					0,19 0,1<P<0,2	0,65<1,75	

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.5.D.f} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D^2$, за програмою "NUMERI": $\bar{Y}_{CK.5.D} = 17,4935$ - середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$ і $\sum (\bar{Y}_{CK.4.5.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2 = 2,2260158$.

D	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.5.D.f.j}$ за формулою	17,3540	17,4763	17,6024	17,5410
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$	16,7286	18,5923	16,8728	17,7802
$(\bar{Y}_{CK.5.D.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2$	0,39112516	1,245456	0,53231616	0,05721664

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D.j} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2,22611396}{4-1}} = 0,86.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.5.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(17,4935 - 16,7286)^2 + (17,4935 - 18,5923)^2 + (17,4935 - 16,8728)^2 + (17,4935 - 17,7802)^2}{4}} = 0,7516.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.5.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(17,4935 - 17,354)^2 + (17,4935 - 17,4763)^2 + (17,4935 - 17,6024)^2 + (17,4935 - 17,541)^2}{4}} = 0,0920.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції

$$r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 0,092 / 0,7516 = 0,1224.$$

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,1224 \sqrt{4-2}}{\sqrt{1-0,1224^2}} = 0,17 \triangleright T_{KP} = 0 \rightarrow P = 0.$$

За наведеним вище матеріалом за експериментальними $Y_{E,i}$ і скорегованими $Y_{СК.1} \dots Y_{СК.5}$ вхідними даними для кожного зовнішнього незалежного чинника підібрана емпірична залежність, яка задовільно апроксимує вхідні дані, тобто можна переходити до останнього етапу методики - створення багатофакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції.

При підготовці прикладу використання запропонованої методики наведено також і варіант четвертого етапу, який використовується у випадку незадовільного підбору задовільної апроксимуючої залежності хоча б для одного з чотирьох незалежних зовнішніх чинників при використанні перших трьох етапів.

Четвертий етап. Підбір емпіричних частинних залежностей за прологарифмованими вхідними даних експерименту, табл.2.3

В табл.П.25 наведено результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{СК.6,i}$ за параметрами А і В.

Таблиця П.25 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{СК.6,i}$ за значеннями параметрів А і В

В\А		A1=82	A2=133	A3=188	A4=285	Сума	Середнє	Анти log
В1		0,7439	3,3686	14,7959	27,5384			
	lg	-0,1285	0,5274	1,1701	1,4399	3,0089	0,7523	5,6528
В2		0,9755	5,4009	18,6954	25,1398			
	lg	-0,0108	0,7325	1,2717	1,4004	3,3938	0,8484	7,0542
В3		2,1132	5,9675	20,6856	39,6878			
	lg	0,3249	0,7758	1,3157	1,5986	4,0150	1,0038	10,0867
В4		2,6751	5,895	19,5022	58,4906			
	lg	0,4273	0,7705	1,2901	1,7671	4,2550	1,0637	11,5809
Сума		0,6129	2,8062	5,0476	6,206	14,6727		
Середнє		0,1532	0,7016	1,2619	1,5515		3,6682	
Анти lg		1,4231	5,0298	18,2768	35,6041			

Таблиця П.26 – Результати усереднення прологарифмованих вхідних даних експерименту $Y_{СК.6,i}$ за значеннями параметрів А і В

С\D		D1=400	D2=800	D3=1700	D4=2500	Сума	Середнє	Анти log
С1		0,7439	18,6954	39,6878	5,895			
	lg	-0,1285	1,2717	1,5986	0,7705	3,5123	0,8781	7,5526
С2		5,9675	58,4906	14,7959	0,9755			
	lg	0,7758	1,7671	1,1701	-0,0108	3,7022	0,9256	8,4248
С3		19,5022	2,1132	5,4009	27,5384			
	lg	1,2901	0,3249	0,7325	1,4399	3,7874	0,9468	8,8482
С4		25,1398	3,3686	2,6751	20,6856			
	lg	1,4004	0,5274	0,4273	1,3157	3,6708	0,9177	8,2737
Сума		3,3378	3,8911	3,9285	3,5153	14,6727		
Середнє		0,8344	0,9728	0,9821	0,8788			
Анти log		6,8305	9,3924	9,5968	7,5653			

За даними табл.П.25 і П.26, з використанням програм App.1 і "HUMERI", проводиться підбір емпіричних залежностей $\bar{Y}_{СК.6.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{СК.6.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{СК.6.C.f} = f(C)$, $\bar{Y}_{СК.6.D.f} = f(D)$.

У табл.П.27 наведено частинні емпіричні залежності $\bar{Y}_{СК.6.A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{СК.6.B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{СК.6.C.f} = f(C)$, $\bar{Y}_{СК.6.D.f} = f(D)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями прологарифмованих експериментальних даних і відношення максимального значення фактора Y до його мінімального.

Таблиця П.27 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей та перевірка умов задовільної апроксимації прологарифмованих експериментальних даних

Незалежний фактор	Частинні емпіричні залежності					Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{S}}$ S=A, B, C, D	$\frac{Y_{max}}{Y_{min}}$
A	A _j	82	133	188	285	0,9891 0,98<P<0,99	2,27>1,52	25,02
	$\bar{Y}_{CK.6.A.j}$	1,4231	5,0298	18,2762	35,6041			
	$\bar{Y}_{CK.6.A.f.j} = 0,1762 \cdot A_j - 15,2323$							
B	B _j	10	15	20	25	0,9886 0,98<P<0,99	0,41<0,85	2,05
	$\bar{Y}_{CK.6.B.j}$	5,6528	7,0542	10,0867	11,5809			
	$\bar{Y}_{CK.6.B.f.j} = 0,4163 \cdot B_j + 1,30777$							
C	C _j	0,1	40	70	90	0,8965 0,8<P<0,9	0,25<0,83	1,17
	$\bar{Y}_{CK.6.C.j}$	7,5526	8,4248	8,8482	8,2737			
	$\bar{Y}_{CK.6.C.j} = 7,88705 \cdot C_j^{0,0183}$							
D	D _j	400	800	1700	2500	0,9574 0,95<P<0,98	0,39<0,83	1,40
	$\bar{Y}_{CK.6.D.j}$	6,8305	9,3924	9,5968	7,5653			
	$\bar{Y}_{CK.6.D.f.j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$							

Значення емпіричної функції $\bar{Y}_{CK.6.D.f.j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$ за програмою "NUMERI": $\bar{Y}_{CK.6.D} = 8,346$ – середнє за значеннями $\bar{Y}_{CK.6.D.j}$ і

$$\sum (\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2 = 0,4639001.$$

D _j	400	800	1700	2500
$\bar{Y}_{CK.6.D.f.j}$ за формулою	7,1160	8,8829	9,9298	7,4560
Скореговані значення $\bar{Y}_{CK.5.D.i}$	6,8305	9,3924	9,5968	7,5653
$(\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2$	0,08151025	0,25959025	0,110889	0,01194649

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (\bar{Y}_{CK.6.D.j} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,46393599}{4 - 1}} = 0,393.$$

Середнє квадратичне відхилення σ_y за скорегованими значеннями $\bar{Y}_{CK.5.D.j}$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.6.D.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(6,8305 - 8,346)^2 + (9,3924 - 8,346)^2 + (9,5968 - 8,346)^2 + (7,5653 - 8,346)^2}{4}} = 1,1796.$$

Міжгрупове середнє квадратичне відхилення $\sigma_{y.f}$ за значеннями емпіричної залежності

$$\sigma_{y.f} = \sqrt{\sum (\bar{Y}_{CK.5.D} - \bar{Y}_{CK.6.D.f.j})^2 / n} = \sqrt{\frac{(7,1160 - 8,346)^2 + (8,8829 - 8,346)^2 + (9,9298 - 8,346)^2 + (7,456 - 8,346)^2}{4}} = 1,1293.$$

Емпіричне значення коефіцієнта кореляції $r_B = \frac{\sigma_{y.f}}{\sigma_y} = 1,1293 / 1,1796 = 0,9574$.

$$T_{CP} = \frac{r_B \sqrt{N - 2}}{\sqrt{1 - r_B^2}} = \frac{0,9574 \sqrt{4 - 2}}{\sqrt{1 - 0,9574^2}} = 4,69 > T_{KP} = 4,3 \rightarrow P = 0,95.$$

П'ятий етап. Встановлення, за емпіричними частинними залежностями $\bar{Y}_{A.f} = f(A)$, $\bar{Y}_{B.f} = f(B)$, $\bar{Y}_{C.f} = f(C)$ і $\bar{Y}_{D.f} = f(D)$, багатофакторної емпіричної моделі нелінійної кореляції виду $Y = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D)$.

В табл. П.28-П.31 наведено всі варіанти підбору емпіричних залежностей за експериментальними, прологарифмованими і скорегованими, за методами Протодьяконова і Яремйчука-Райхерта, даними для всіх зовнішніх факторів планованого експерименту. За Найкращим варіантом підбору вважається залежність, за якою довірча ймовірність кореляційного зв'язку між залежною змінною величиною Y і незалежним зовнішнім чинником більша за 0,95. Якщо таких залежностей декілька то приймається залежність з найбільшою величиною $0,1\bar{Y}_A / \sigma_0$. Прологарифмовані вхідні дані використовуються тільки в тому випадку, коли за експериментальними і скорегованими даними хоча б для одного фактора не підібрана залежність, для якої результати апроксимації негативні.

Таблиця П.28 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{A,f} = f(A)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_A$	$\frac{0,1\bar{Y}_A}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.2	$\bar{Y}_{A,f,j} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j})^2$	0,9777 0,95<P<0,98	1,56<1,57	1,01
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1.A,f,j} = 11,4426 + 0,0355 \ln A_j$	0,16 0,1<P<0,2 Вплив А нейтралізовано	1,53>1,38	0,9
Скореговані дані (Ск. 2.П) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2.A,f,j} = 10,2030 + 0,47387 \ln A_j$	0,16 0,1<P<0,2 Вплив А і В нейтралізовано	1,53>1,26	0,8
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3.A,f,j} = 29,9513 - 3,072 \ln A_j$	0,42 0,4<P<0,5 Вплив А нейтралізовано	3,46>1,44	0,42
Скореговані дані (Ск. 4.Я) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4.A,f,j} = 24,9119 - 2,0683 \ln A_j$	0,32 0,3<P<0,4 Вплив А і В нейтралізовано	3,2>1,44	0,45
Прологарифмовані дані, табл.25	$\bar{Y}_{CK.6.A,f,j} = 0,1762 \cdot A_j - 15,2323$	0,9891 0,98<P<0,99	2,27>1,52	0,67

Краща залежність за табл.28 – $\bar{Y}_{A,f,j} = (-4,768 + 0,6458123\sqrt{A_j})^2$

Таблиця П.29 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{B,f} = f(B)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0,1\bar{Y}_B$	$\frac{0,1\bar{Y}_B}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.3	$\bar{Y}_{B,f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$	0,9821 0,98<P<0,99	0,063<1,57	24,9
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1.B,f,j} = 8,781 + 7,114044 \cdot 10^{-4} \cdot B_j^3$	0,9691 0,95<P<0,98	0,54<1,38	2,56
Скореговані дані (Ск. 2.П) $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2.B,f,j} = 0,0028 \cdot B_j + 12,54353$	0,03 0<P<0,1 Вплив В нейтралізовано	0,54<1,26	2,33
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3.B,f,j} = 0,746398 \cdot B_j + 1,38671$	0,9885 0,98<P<0,99 Вплив А нейтралізовано	0,74<1,44	1,94
Скореговані дані (Ск. 4.Я) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4.B,f,j} = 15,6003 \cdot B_j^{-0,02719}$	0,18 0,1<P<0,2 Вплив А і В нейтралізовано	0,85<1,44	1,69
Прологарифмовані дані, табл.25	$\bar{Y}_{CK.6.B,f,j} = 0,4163 \cdot B_j + 1,30777$	0,9886 0,98<P<0,99	0,41<0,85	2,07

Краща залежність за табл.29 – $\bar{Y}_{B,f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$

Таблиця П.30 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{C,f} = f(C)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{C}}$	$\frac{0, I\bar{Y}_{\bar{C}}}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.3	$\bar{Y}_{C,f,j} = 18,1783098 \cdot C_j^{0,99681}$	0,6175 0,6<P<0,7	2,67>1,57	0,59
	$\bar{Y}_{C,f,j} = 16,6035508 + 0,1286562 \cdot C_j - 2,0027 \cdot 10^{-3} \cdot C_j^2$	0,46 0,3<P<0,4	1,64>1,57	0,96
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.1..C,j} = 14,703 - 7,424781 \cdot 10^{-6} \cdot C_j^3$	0,59 0,5<P<0,6	2,06>1,38	0,67
Скореговані дані (Ск. 2.П) $B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.2.C,j} = -0,0482 \cdot C_j + 15,00317$	0,59 0,5<P<0,6	2,6>1,26	0,48
		Вплив А і В нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.3..C,j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$	0,9997 0,999<P<1,0	0,04<1,44	36
		Вплив А нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 4.Я) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.4..C,j} = 13,77805 \cdot C_j^{0,01882}$	0,9311 0,9<P<0,95	0,36<1,44	4
		Вплив А і В нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 5.Я) $A, B \text{ і } i \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{CK.5..C,j} = 16,7312 \cdot C_j^{0,01695}$	0,8378 0,8<P<0,9	0,65<1,75	2,69
		Вплив А, В і D нейтралізовано		
Прологарифмовані дані, табл.26	$\bar{Y}_{CK.6.C,j} = 7,88705 \cdot C_j^{0,0183}$	0,8965 0,8<P<0,9	0,25<0,83	3,32

Краща залежність за табл.П.30 – $\bar{Y}_{CK.3..C,j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$

Таблиця П.31 – Результати підбору частинної залежності $\bar{Y}_{D,f} = f(D)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції і інтервал його довірчої ймовірності	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{Y}_{\bar{D}}$	$\frac{0, I\bar{Y}_{\bar{D}}}{\sigma_0}$
Експериментальні дані, табл.4	$\bar{Y}_{D,f,j} = 11,0676538 + 0,0109033 \cdot D_j - 4,04723 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6423 0,5<P<0,6	2,68>1,57	0,58
Скореговані дані (Ск. 1.П) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.1.D.f,j} = 9,09847912 + 0,0109042 \cdot D_j - 4,04747 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6402 0,5<P<0,6	2,68>1,38	0,51
Скореговані дані (Ск. 2.П) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.2.D.f,j} = 7,9317931 + 0,0109039 \cdot D_j - 4,04739 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,6422 0,6<P<0,7	2,68>1,26	0,47
		Вплив А і В нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 3.Я) $A \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.1.D.f,j} = 6,4154363 + 0,0161368 \cdot D_j - 5,53377 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9525 P≈0,95	0,92<1,44	1,56
		Вплив А нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 4.Я) $A \text{ і } B \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.4.D.f,j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9554 0,95<P<0,98	0,74<1,44	1,95
		Вплив А і В нейтралізовано		
Скореговані дані (Ск. 5.Я) $A, B \text{ і } D \approx \text{const}$	$\bar{Y}_{3K.5.D.f,j} = 17,1908464 + 0,0004589 \cdot D_j - 1,27536 \cdot 10^{-7} \cdot D_j^2$	0,1224 0<P<0,1	0,86<1,75	2,03
		Вплив А, В і D нейтралізовано		
Прологарифмовані дані, табл.26	$\bar{Y}_{CK.6.D.f,j} = 4,5480196 + 0,0074212 \cdot D_j - 2,5032 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	0,9574 0,95<P<0,98	0,39<0,83	2,13

Краща залежність за експериментальними і скоригованими даними $\bar{Y}_{3K.4.D.j} -$

$$\bar{Y}_{3K.4.D.f.j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2.$$

Таблиця П.32 – Усереднені експериментальні та скореговані значення функції Y і значення, визначені за кращими емпіричними рівняннями регресії частинних залежностей

$$\bar{Y}_{A.f} = f(A), \bar{Y}_{B.f} = f(B), \bar{Y}_{C.f} = f(C) \text{ і } \bar{Y}_{D.f} = f(D).$$

A_j	82	133	188	285
Експериментальні значення $Y_{A,i}$	1,6269	5,158	18,4198	37,7142
$\bar{Y}_{A.f,j} = (-4,768 + 0,6458123 \sqrt{A_j})^2$	<u>1,1666</u>	<u>7,1817</u>	<u>16,7030</u>	<u>37,6329</u>
B_j	10	15	20	25
Експериментальні значення $Y_{B,i}$	11,6117	12,5529	17,1135	21,6407
$\bar{Y}_{B.f,j} = 1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943$	<u>11,2675</u>	<u>13,3950</u>	<u>16,5130</u>	<u>21,5229</u>
C_j	0,1	40	70	90
Скореговані значення $Y_{CK.3.i}$	12,4434	14,0698	15,2882	15,9932
$\bar{Y}_{CK.3.C,j} = 0,03974 \cdot C_j + 12,46048$	<u>12,4644</u>	<u>14,0501</u>	<u>15,2423</u>	<u>16,0371</u>
D_j	400	800	1700	2500
Скореговані значення $Y_{CK.4.i}$	11,5978	16,3593	16,7738	13,1656
$\bar{Y}_{3K.4.D.f,j} = 7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2$	<u>12,1349</u>	<u>15,4009</u>	<u>17,4005</u>	<u>12,9603</u>

Багатофакторна модель у вигляді добутку буде мати вигляд

$$Y = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D) = \bar{B} \cdot (-4,768 + 0,6458123 \sqrt{A_j})^2 x(1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943) x(0,03974 \cdot C_j + 12,46048) x(7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2).$$

У формулі моделі $\bar{B}$ – середнє значення постійної складової B_i , де $i=1...16$ – порядковий номер дослідження експерименту, $j=1...4$ – порядковий номер рівня незалежного фактору

У табл.П.33 наведені значення коефіцієнта B_i , визначені за формулою

$$B_i = \frac{Y_{E,i}}{f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)},$$

де $Y_{E,i}$ – експериментальні значення функції за даними табл.П.1, яка відповідає i -тому дослідженню; $f(A_j) \cdot f(B_j) \cdot f(C_j) \cdot f(D_j)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, значення яких відповідають умовам i -того дослідження, табл.П.32.

$$B_1 = \frac{Y_{E,1}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_1 = 400)} = \frac{0,7439}{1,1666 \cdot 11,2675 \cdot 12,4644 \cdot 12,1349} = \frac{0,7439}{1988,18649} = 3,7416 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_2 = \frac{Y_{E,2}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_4 = 2500)} = \frac{0,9755}{1,1666 \cdot 13,395 \cdot 14,0501 \cdot 12,9603} = \frac{0,9755}{2845,503734} = 3,42821 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_3 = \frac{Y_{E,3}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_2 = 800)} = \frac{2,1132}{1,1666 \cdot 16,513 \cdot 15,2423 \cdot 15,4009} = \frac{2,1132}{4522,145786} = 4,673 \cdot 10^{-4}.$$

$$\begin{aligned}
B_4 &= \frac{Y_{E.4}}{f(A_1 = 82) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_3 = 1700)} = \\
&= \frac{2,6751}{1,1666 \cdot 21,5229 \cdot 16,0371 \cdot 17,4005} = \frac{2,6751}{7006,648405} = 3,81794 \cdot 10^{-4}. \\
B_5 &= \frac{Y_{E.5}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_2 = 800)} = \\
&= \frac{3,3686}{7,1817 \cdot 11,2675 \cdot 16,0371 \cdot 15,4009} = \frac{3,3686}{19986,04056} = 1,68547 \cdot 10^{-4}. \\
B_6 &= \frac{Y_{E.6}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_3 = 1700)} = \\
&= \frac{5,4009}{7,1817 \cdot 13,395 \cdot 15,2423 \cdot 17,4005} = \frac{5,4009}{25514,21497} = 2,1168 \cdot 10^{-4}. \\
B_7 &= \frac{Y_{E.7}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_1 = 400)} = \\
&= \frac{5,9675}{7,1817 \cdot 16,5130 \cdot 14,0501 \cdot 12,1349} = \frac{5,9675}{20219,42763} = 2,95136 \cdot 10^{-4}. \\
B_8 &= \frac{Y_{E.8}}{f(A_2 = 133) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_4 = 2500)} = \\
&= \frac{5,895}{7,1817 \cdot 21,5229 \cdot 12,4644 \cdot 12,9603} = \frac{5,895}{24969,76641} = 2,36085 \cdot 10^{-4}. \\
B_9 &= \frac{Y_{E.9}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_3 = 1700)} = \\
&= \frac{14,7959}{16,703 \cdot 11,2675 \cdot 14,0501 \cdot 17,4005} = \frac{14,7959}{46011,1609} = 3,21571 \cdot 10^{-4}. \\
B_{10} &= \frac{Y_{E.10}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_2 = 800)} = \\
&= \frac{18,6954}{16,703 \cdot 13,395 \cdot 12,4644 \cdot 15,4009} = \frac{18,6954}{42949,16033} = 4,35291 \cdot 10^{-4}. \\
B_{11} &= \frac{Y_{E.11}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_3 = 20) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_4 = 2500)} = \\
&= \frac{20,6856}{16,703 \cdot 16,513 \cdot 16,0371 \cdot 12,9603} = \frac{20,6856}{57327,28231} = 3,60833 \cdot 10^{-4}. \\
B_{12} &= \frac{Y_{E.12}}{f(A_3 = 188) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_1 = 400)} = \\
&= \frac{19,5022}{16,703 \cdot 21,5229 \cdot 15,2423 \cdot 12,1349} = \frac{19,5022}{66493,92603} = 2,93292 \cdot 10^{-4}. \\
B_{13} &= \frac{Y_{E.13}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_1 = 10) \cdot f(C_3 = 70) \cdot f(D_4 = 2500)} = \\
&= \frac{27,5384}{37,6329 \cdot 11,2675 \cdot 15,2423 \cdot 12,9603} = \frac{27,5384}{83764,6567} = 3,28759 \cdot 10^{-4}. \\
B_{14} &= \frac{Y_{E.14}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_2 = 15) \cdot f(C_4 = 90) \cdot f(D_1 = 400)} = \\
&= \frac{25,1398}{37,6329 \cdot 13,395 \cdot 16,0371 \cdot 12,1349} = \frac{25,1398}{98100,77616} = 2,56265 \cdot 10^{-4}.
\end{aligned}$$

$$B_{15} = \frac{Y_{E.15}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_2 = 20) \cdot f(C_1 = 0,1) \cdot f(D_3 = 1700)} =$$

$$= \frac{39,6878}{37,6329 \cdot 16,513 \cdot 12,4644 \cdot 17,4005} = \frac{39,6878}{6,2935} = 2,94462 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_{16} = \frac{Y_{E.16}}{f(A_4 = 285) \cdot f(B_4 = 25) \cdot f(C_2 = 40) \cdot f(D_2 = 800)} =$$

$$= \frac{58,4906}{37,6329 \cdot 21,5229 \cdot 14,0501 \cdot 15,4009} = \frac{58,4906}{175264,513} = 3,33727 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця П.33 – Значення коефіцієнта В для всіх 16-ти дослідів планованого експеримента

№експ.	1	2	3	4	5	6
B_i	$3,7416 \cdot 10^{-4}$	$3,4282 \cdot 10^{-4}$	$4,673 \cdot 10^{-4}$	$3,8179 \cdot 10^{-4}$	$1,6855 \cdot 10^{-4}$	$2,1168 \cdot 10^{-4}$
№експ.	7	8	9	10	11	12
R	$2,9514 \cdot 10^{-4}$	$2,3608 \cdot 10^{-4}$	$3,2157 \cdot 10^{-4}$	$4,3529 \cdot 10^{-4}$	$3,6083 \cdot 10^{-4}$	$2,9329 \cdot 10^{-4}$
№експ.	13	14	15	16		
R	$3,2876 \cdot 10^{-4}$	$2,5626 \cdot 10^{-4}$	$2,9446 \cdot 10^{-4}$	$3,3373 \cdot 10^{-4}$		

У табл.П.34 наведено статистичні характеристики сукупності значень B_i та результати визначення артефактів (різко відмінних значень коефіцієнта В). Артефакти знаходяться за межами інтервалу ($B_{CP} - \Delta$; $B_{CP} + \Delta$). Значення Δ обчислюється за формулою

$$\Delta = t_{KP} \cdot \sigma \sqrt{\frac{N+1}{N}} = 1,75 \cdot 0,7827 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{17/16} = 1,4119 \cdot 10^{-4}$$

За цим значенням межі інтервалу виділення артефактів: $1,7773 \cdot 10^{-4} - 4,6011 \cdot 10^{-4}$.

Таблиця П.34 – Статистичні характеристики вибірки і результати відбраковки артефактів

B_{CP}	D_B	σ_B	K_{CT}	Відб.зн, N'	B'_{CP}	D'_B	σ'_B
$3,1892 \cdot 10^{-4}$	$0,6126 \cdot 10^{-8}$	$0,7827 \cdot 10^{-4}$	$1,75$ $\alpha=0,1$	$4,673 \cdot 10^{-4}$; $1,6855 \cdot 10^{-4}$	$3,1899 \cdot 10^{-4}$	$0,3639 \cdot 10^{-8}$	$0,6032 \cdot 10^{-4}$

Примітка: B'_{CP} , D'_B , σ'_B – статистичні характеристики вибірки значень коефіцієнта B_i без артефактів.

Величина коефіцієнту варіації

$$K_{BAP} = \frac{\sigma'_B}{B'_{CP}} \cdot 100\% = \frac{0,6032}{3,1899} \cdot 100\% = 18,9\%$$

Це значення знаходиться в інтервалі від 10% до 33% тобто сукупність однорідна середньої мінливості і середнє значення $3,1899 \cdot 10^{-4}$ є типовим рівнем ознаки цієї сукупності.

За значенням коефіцієнту B_{CP} рівняння багатofакторної емпіричної моделі множинної нелінійної кореляції буде мати вигляд

$$Y_{M.i} = \bar{B} \cdot f(A) \cdot f(B) \cdot f(C) \cdot f(D) = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot \left(-4,768 + 0,6458123 \sqrt{A_j} \right)^2 \cdot x(1 / -0,002819238 \cdot B_j + 0,116943) \cdot x(0,03974 \cdot C_j + 12,46048) \cdot x(7,4059744 + 0,0136511 \cdot D_j - 4,57174 \cdot 10^{-6} \cdot D_j^2).$$

Обчислимо значення функції за формулою багатofакторної моделі $Y_{M.i}$ для кожного i -того дослідів факторного експерименту, $i=1 \dots 16$.

$$Y_{M.1} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 1988,18649 = 0,6342. \quad Y_{M.2} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 2845,503734 = 0,9077.$$

$$Y_{M.3} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 4522,145786 = 1,4425. \quad Y_{M.4} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 7006,648405 = 2,2350.$$

$$Y_{M.5} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 19986,04056 = 6,3753. \quad Y_{M.6} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 25514,21497 = 8,1388.$$

$$Y_{M.7} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 20219,42763 = 6,4498. \quad Y_{M.8} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 24969,76641 = 7,9651.$$

$$Y_{M.9} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 46011,1609 = 14,6771. \quad Y_{M.10} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 42949,16033 = 13,7004.$$

$$Y_{.11} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 57327,28231 = 18,2869. \quad Y_{.M12} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 66493,92603 = 21,2109.$$

$$Y_{.13} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 83764,6567 = 26,7201. \quad Y_{.M14} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 98100,77616 = 31,2932.$$

$$Y_{.15} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 134780,4099 = 42,9938. \quad Y_{.M16} = 3,1899 \cdot 10^{-4} \cdot 175264,513 = 55,9076.$$

В табл.П.35 наведено значення функції $Y_{M.i}$, визначені за рівнянням багатофакторної моделі, та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними значеннями планованого експерименту $Y_{E.i}$, обрахованої за наступним рівнянням

$$ВП\% = \frac{Y_{E.i} - Y_{M.i}}{Y_{E.i}} \cdot 100$$

Таблиця П.35 – Експериментальні значення функції $Y_{E.i}$ і значення $Y_{M.i}$, визначені за емпіричною моделлю множинної нелінійної кореляції

№ досл.	A	B	C	D			ВП%
1	82	10	400	0,1	0,7439	0,6342	14,8
2	82	15	2500	40	0,9755	0,9077	6,95
3	82	20	800	70	2,1132	1,4425	31,7
4	82	25	1700	90	2,6751	2,235	16,4
5	133	10	800	90	3,3686	6,3753	-89,3
6	133	15	1700	70	5,4009	8,1388	-50,7
7	133	20	400	40	5,9675	6,4498	-8,1
8	133	25	2500	0,1	5,895	7,965	-35,1
9	188	10	1700	40	14,7959	14,6771	0,8
10	188	15	800	0,1	18,6954	13,7004	26,7
11	188	20	2500	90	20,6856	18,2869	11,6
12	188	25	400	70	19,5022	21,2109	-8,8
13	285	10	2500	70	27,5384	26,7201	3,0
14	285	15	400	90	25,1398	31,2932	-24,5
15	285	20	1700	0,1	39,6878	42,9938	-8,3
16	285	25	800	40	58,4906	55,9076	4,4

Середнє значення відносної похибки без артефактів 31,7% і 89,3%, відбракованих за вибіркою значень коефіцієнта B: $ВП_{CP}=15,7\%$.

Приклад виділення лінійної (умовно однорідної) ділянки пробуреної свердловини

В табл.ПВ.1 подано значення проходки на долото, механічної швидкості і часу буріння для аналізованого інтервалу заглиблення свердловини.

Таблиця ПВ.1 – 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
$V_{MEH.i}$, 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. ПВ.2.

Таблиця ПВ.2 – 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

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i}}{\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n T_{B,i})^2} = \frac{282,02 - \frac{88,69 \cdot 10}{5}}{2798,2801 - \frac{(88,69)^2}{5}} = \frac{104,64}{1225,09688} \approx 0,08541; \quad (\text{ПВ.1})$$

$$B = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n H_{B,i} - A \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i}) = \frac{1}{5} (10 - 0,08541 \cdot 88,69) \approx 0,4850. \quad (\text{ПВ.2})$$

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.ПВ.3.

Таблиця ПВ.3 – Величини для перевірки адекватності емпіричного рівняння лінійної регресії методом однофакторного дисперсійного аналізу за значеннями T_B і H_B

№	$H_{B,i}$	$H_{B,P,i}$	$(H_{B,i} - H_{B,P,i})^2$	$(H_{B,i} - \bar{H}_B)^2$	$(H_{B,P,i} - \bar{H}_B)^2$
1	0	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.2.28: $H_{B,P,i}$ – 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

$$F_{СП} = \frac{K/v_2}{C/v_3} = \frac{K/1}{C/(n-2)} = \frac{8,94819671/1}{1,07359671/(5-2)} = 25,00. \quad (\text{ПВ.3})$$

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: $F_{СП} < F_{KP(\alpha; v_2; v_3)}$.

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 [5, 16, 26], 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 $v_2=1$, $v_3=n-2=5-2=3$, 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

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{\left[\sum_{i=1}^n H_{B,i} \cdot T_{B,i} - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{B,i} \cdot \sum_{i=1}^n H_{B,i} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n T_{B,i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n T_{B,i} \right)^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n H_{B,i}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n H_{B,i} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{\left[282,02 - \frac{88,69 \cdot 10}{5} \right]^2}{\left[2798,2801 - \frac{(88,69)^2}{5} \right] \cdot \left[30 - \frac{10^2}{5} \right]} = \\ &= \frac{104,64^2}{1225,09688 \cdot 10} \approx 0,8938 \rightarrow r = 0,9454. \end{aligned} \quad (\text{ПВ.4})$$

Спостережуване значення критерію Стюдента

$$T_{СП} = \frac{r_B \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_B^2}} = \frac{0,9454 \sqrt{5-2}}{\sqrt{1-0,9454^2}} = 5,02. \quad (\text{ПВ.5})$$

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

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{C}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,073597}{5-1}} \approx 0,52. \quad (\text{ПВ.6})$$

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

На рис. ПВ.1-ПВ.3 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.

Рисунок ПВ.1 – Вікно введення кількості експериментальних точок

Рисунок ПВ.2 – 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 $H_B = A \cdot T_B + B$

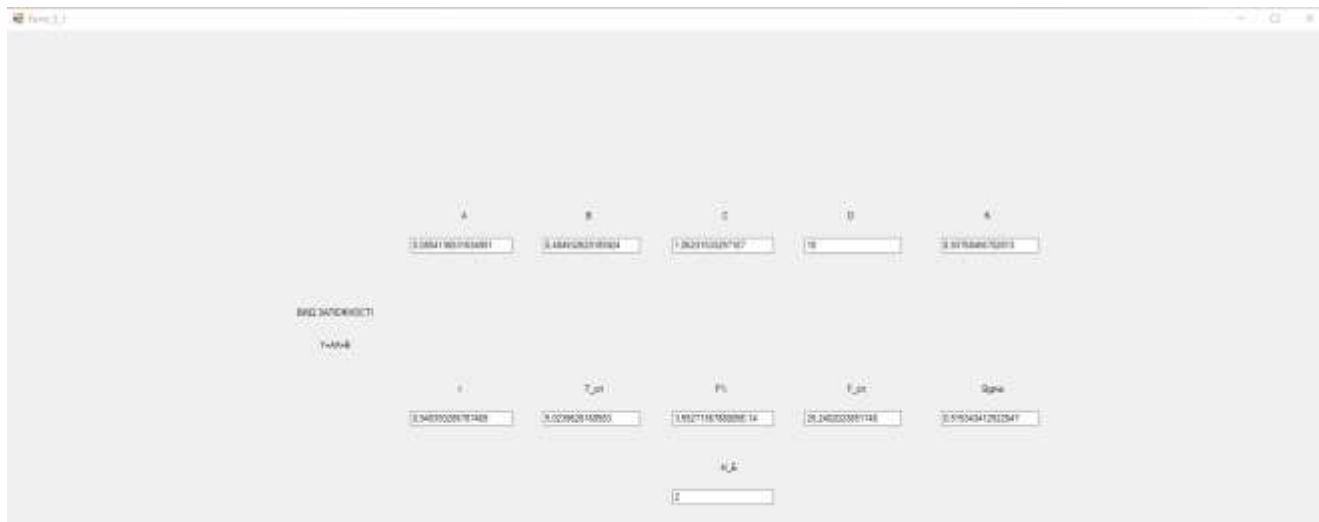


Рисунок ПВ.3 – Вікно з результатами перевірки умов лінійності емпіричного рівняння регресії виду $H_B = A \cdot T_B + B$ за вхідними даними прикладу

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. 2.29.

Таблиця 2.29 – 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_{KP} $\alpha=0,01$	$T_{СП}$	T_{KP} $\alpha=0,01$	$\bar{H}_B$	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 підтверджені, виділені жирним шрифтом. В табл. n' – це ступінь вільності при визначенні критичних значень F_{KP} і T_{KP} .