

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

**Юрич Лідія Романівна**



**УДК 622.24.05:622.276**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН  
З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ПОРОДОРУЙНІВНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

Спеціальність 05.15.10 – буріння свердловин

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Івасів Василь Михайлович**,  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу, професор кафедри  
нафтогазових машин та обладнання.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Кунцяк Ярослав Васильович**,  
ПрАТ “Науково-дослідне і конструкторське  
бюро бурового інструменту”, м. Київ, генера-  
льний директор;

кандидат технічних наук  
**Лівінський Андрій Михайлович**,  
ТОВ “Ендейвер”, м. Полтава, технічний дире-  
ктор.

Захист дисертації відбудеться 13 травня 2021 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий \_\_\_\_ квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, кандидат  
технічних наук, доцент



І. М. Ковбасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** На сьогодні проблема нарощування ресурсного потенціалу вуглеводнів і видобутку нафти та газу є надзвичайно актуальною для України. Одним із шляхів її вирішення є збільшення обсягів буріння. При цьому, для забезпечення проводки свердловини згідно з проектом та високих техніко-економічних показників буріння доводиться вирішувати різнопланові та багатофакторні задачі.

Однією з задач при плануванні спорудження свердловин є вибір оптимального для певних умов буріння породоруйнівного інструменту з максимальним вичерпанням його ресурсу. Зважаючи на зростання обсягів буріння свердловин долотами PDC, додаткових досліджень потребують питання впливу стану їх озброєння на ефективність роботи. Використання для цього в промислових умовах дороговартісних вимірювальних комплексів не завжди є економічно виправданим, чим зумовлена певна інформаційна невизначеність щодо умов роботи як породоруйнівного, так і бурильного інструменту в цілому. Тому розроблення методів забезпечення ефективного руйнування гірських порід за безаварійної роботи компоновок низу бурильної колони (КНБК) з урахуванням особливостей взаємодії долота з вибоєм свердловини є актуальною задачею, вирішення якої передбачає створення недорогих, простих і надійних в експлуатації технічних засобів для реєстрації навантаженості глибинного обладнання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота має науково-прикладний характер і виконана в рамках загального плану наукових досліджень Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, держбюджетної науково-дослідної роботи Д-7-15-П – «Розроблення інноваційних технологій освоєння родовищ природних вуглеводнів з низькопроникними колекторами» (номер держреєстрації РК 0115U002281), науково-дослідних робіт «Підвищення працездатності нафтогазових машин та обладнання» (номер держреєстрації 0118U006955) та «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу, їх транспортування та диверсифікації постачання для підвищення енергетичної безпеки України» (номер держреєстрації 0115U007099).

### **Мета і завдання дослідження.**

Мета дисертаційної роботи полягає в забезпеченні ефективного руйнування гірських порід за безаварійної роботи компоновок низу бурильної колони.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення таких завдань:

1. Аналіз досліджень щодо умов руйнування гірських порід долотами PDC і забезпечення безаварійної роботи КНБК.
2. Дослідження впливу ступеню зношення озброєння доліт на силові та енергетичні параметри руйнування гірської породи.
3. Дослідження роботи доліт ріжучо-сколюючого типу в складі бурильного інструменту за повздовжніх та крутильних коливань.
4. Розроблення методу коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК.

5. Розроблення технічних засобів для оцінювання навантаженості КНБК та шляхів її зниження.

**Об'єктом дослідження** є процес руйнування гірської породи та обумовлена ним навантаженість елементів КНБК.

**Предметом досліджень** є вплив ступеня зношення породоруйнівного інструменту на силові та енергетичні параметри процесу.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі використовується комплексний підхід, який включає критичний аналіз та узагальнення опублікованих науково-технічних досягнень у поєднанні з теоретичними та експериментальними дослідженнями. Теоретичні дослідження здійснено шляхом математичного моделювання об'єкта досліджень з використанням основних положень та законів аналітичної механіки, теорії коливань, механіки твердого тіла та теорії руйнування. Числові дослідження виконано з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм та автоматизованих систем. Експериментальні лабораторні дослідження проводилися шляхом руйнування гірської породи з реєстрацією силових параметрів процесу різання та параметрів вертикальних коливань. Обробку та аналіз даних здійснено з використанням статистичних методів.

**Наукова новизна** одержаних в дисертаційній роботі результатів полягає у наступному:

– вперше експериментально встановлено закономірності впливу ступеня зношення одиничного різця на силові та енергетичні параметри процесу різання гірської породи;

– створено і реалізовано математичну модель процесу зношування озброєння долота в складі бурильного інструменту за позовжніх та крутильних коливань;

– обґрунтовано метод коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК з врахуванням стану озброєння долота.

**Практичне значення** отриманих результатів визначається можливістю їх використання при проектуванні та коригуванні режимно-технологічних параметрів буріння для забезпечення ефективного руйнування гірських порід і безаварійної роботи компоновок низу бурильної колони та полягає у:

– розробленні удосконаленої конструкції пристрою для вимірювання зусиль в колоні бурильних труб (патент України №88307) та проведенні його дослідно-промислового випробування;

– практичному використанні результатів дисертаційної роботи у керівному документі “Методика аналітично-експериментальної оцінки напружено-деформованого стану елементів бурильної колони”, що впроваджена до використання в ПрАТ “Газінвест”.

Результати напрацювань також впроваджені в навчальний процес кафедри буріння свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень, положення і виснов-

ки, що виносяться на захист, розроблені і належать особисто авторові. Роботи [4, 8, 9] опубліковані одноосібно. З робіт, опублікованих у співавторстві, на захист виносяться тільки ті частини, які розроблені особисто автором.

Зокрема, на основі критичного аналізу літературних джерел, в роботах [7, 10] систематизовано види відмов елементів бурильної колони та їх причини. В роботі [5] встановлено необхідність розроблення методу оцінювання фактичної навантаженості глибинного обладнання, удосконалення системи реєстрації та моніторингу. В роботі [1], за результатами експериментальних досліджень, встановлено закономірності впливу ступеню зношення одиничного різця на силові та енергетичні параметри різання. В роботі [3] здійснено аналіз затрат потужності в механічній системі “силовий привід – бурильна колона – вибій” при роторному бурінні. В роботі [2] встановлено аналітичний взаємозв’язок між параметрами позовжніх та крутильних коливань бурильного інструменту. У роботі [6] проведено аналітичні дослідження впливу параметрів пружної муфти на відхиляюче зусилля на долоті. У [11] прийнято безпосередню участь у розробленні конструкції пристрою та встановленні пружних характеристик дослідного зразка.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова освіта і наука: стан та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 10-12 грудня 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р.); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» (м. Переяслав-Хмельницький, 25 червня 2019 р.)

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на наукових семінарах кафедри нафтогазових машин та обладнання, а також кафедри буріння свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 11 наукових публікаціях, з яких 7 – статті у фахових виданнях України та журналах, що внесені до міжнародних наукометричних баз і систем, 3 – матеріали конференцій, 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Роботу викладено на 184 сторінках машинописного тексту. Обсяг основного тексту складає 123 сторінки. Роботу проілюстровано 45 рисунками та 10 таблицями. Список використаних джерел містить 191 найменування, із яких 135 кирилицею та 56 латиницею.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і основні завдання дисертаційної роботи, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено відомості щодо структури роботи її обсягу та публікацій.

**У першому розділі** проведено аналіз проблематики забезпечення ефективного руйнування гірських порід та безаварійної роботи компонок низу бурильної колони. Їй присвячені дослідження великої кількості науковців: Балицького П. В., Борисова К. І., Белліні Ф., Векерика В. І, Григулецького В. Г., Зайцева В. І., Івасіва В. М., Калініна А. Г., Крижанівського Є. І., Лачиняна Л. А., Лисканича М. В., Мислюка М. А., Мойсишина В. М., Нескоромних В. В., Огороднікова П. І., Пустовойтенка І. П., Сарояна А. Є., Симонянца Л. Є., Третьяка А. А., Федорова Б. В., Чихоткіна А. В., Чудика І. І., Чулкової В.В., Юніна Є. К. та ін.

За результатами проведеного аналізу встановлено відсутність досліджень орієнтованих на практичне застосування теоретичних основ у взаємозв'язку з промисловими результатами. Забезпечення високих техніко-економічних показників буріння та безаварійної роботи КНБК можливе тільки при постійному моніторингу їх навантаженості.

Зважаючи на збільшення обсягів бурових робіт долотами PDC, актуальними є дослідження, спрямовані на підвищення ефективності їх роботи. При цьому першочерговим завданням є розроблення методів та засобів коригування режимно-технологічних параметрів буріння з оцінюванням фактичних навантажень для підвищення ефективності проведення робіт і забезпечення безаварійної роботи КНБК. Коригування необхідно здійснювати як при проєктуванні, так і безпосередньо в процесі добання, зокрема враховуючи ступінь зношення озброєння. Використання для цього в промислових умовах дороговартісних вимірювальних комплексів не завжди є економічно виправданим. Особливої актуальності зазначені питання набувають при розробці родовищ з відносно неглибоким заляганням продуктивних горизонтів, а також при бурінні дегазаційних свердловин в районах видобування корисних копалин шахтним методом. При цьому, бурові роботи здійснюються з використанням маятникових КНБК найпростішої конструкції. Цим зумовлена інформаційна невизначеність щодо умов роботи породоруйнівного та бурильного інструменту. Тому розроблення недорогих, простих і надійних в експлуатації технічних засобів для реєстрації навантаженості глибинного обладнання з дослідженням особливостей взаємодії долота з вибоєм свердловини є актуальною задачею. З точки зору забезпечення безаварійної роботи елементів КНБК важливим є пошук можливостей для зниження їх навантаженості. При цьому необхідним є як правильний вибір конструкції компоновки, так і режимних параметрів її експлуатації.

За результатами проведеного аналізу, сформульовано мету дисертаційної роботи та основні завдання для її досягнення.

**Другий розділ** присвячено експериментальним дослідженням впливу ступеня зношення озброєння породоруйнівного інструменту на силові та енергетичні параметри різання.

Дослідження виконані із застосуванням алмазних твердосплавних пластин (АТП)  $\varnothing 13,5$  мм, що є складовими промислового різця РШ-140 (рис. 1, а, б). З метою моделювання зношення інструменту на його ріжучій частині сформовані поверхні, що відповідають довжині хорди 5,0 мм та 8,0 мм (рис. 1, в, г).



а), б) – нова; в) – з довжиною хорди зношення 5,0 мм;  
г) – з довжиною хорди зношення 8,0 мм

**Рисунок 1** – Загальний вигляд досліджуваних АТП

В ході досліджень здійснено запис складових сили різання і визначено силові та енергетичні параметри процесу. Результати експериментальних досліджень оброблено із застосуванням наявного програмного забезпечення і наведено в таблиці 1.

Встановлено, що при заглибленні АТП відколювання фрагмента породи відбувається дискретно, а об'єм фрагмента, що сколюється, є більшим ніж зона зминання. При глибині різання 2 мм максимальне значення співвідношення досягає 5,2. Для гострої АТП енергоємність процесу руйнування породи при збільшенні глибини різання з  $h = 0,5$  мм до  $h = 2,0$  мм зростає у 3,1 рази, а результуюча сила – у 8 разів. Збільшення ступеню зношення АТП (розміру хорди від 0 до 8 мм) зумовлює зростання результуючої сили. Так, при глибині різання  $h = 0,5$  мм результуюча сила зростає в 1,9 рази, а при  $h = 2,0$  мм – у 5,7 рази. В той же час одночасна зміна ступеню зношування АТП та глибини різання до 2,0 мм, призводить до зростання результуючої сили у 46,7 рази. Слід зазначити, що при різанні на глибину  $h = 2,0$  мм різцем з розміром хорди 8 мм результуюча сила на один ріжучий елемент досягає 2,721 кН. Таким чином, загальне зусилля на різець РШ-140 складатиме 10,88 кН, а це перевищує допустиму для нього величину. Зважаючи на те, що збільшення осьових та крутильних навантажень на бурильну колону зумовлює зростання рівня навантаженості, та, як наслідок, імовірності руйнування її елементів, отримані результати дають підставу регламентувати ступінь зношення ріжучих елементів породоруйнівного інструменту.

Зростання глибини різання практично не впливає на величину питомого навантаження для нових АТП (табл. 1). Для АТП з ознаками зношення їх абсолютні значення є суттєво меншими, ніж для гострих, чого може бути недостатньо для енергоефективного руйнування гірської породи. Таким чином, для забезпечення ефективного руйнування необхідним є збільшення осьового навантаження на породоруйнівний інструмент. Створення ж близьких до максимальних значень навантажень при використанні нового породоруйнівного інструменту, зумовлюватиме його інтенсивні коливання в режимі «stick-slip». Тому, при проектуванні режимних параметрів буріння доцільно планувати гнучку програму навантаження на долото в залежності від стану його озброєння: для нового долота приймати навантаження мінімально необхідним для реалізації техніко-технологічного завдання; у міру спрацювання озброєння навантаження слід збільшувати. Така реалізація процесу буріння знизить імовірність

виникнення коливань долота в режимі «stick-slip» та крутильні і осьові навантаження на бурильну колону.

**Таблиця 1** – Результати експериментальних досліджень

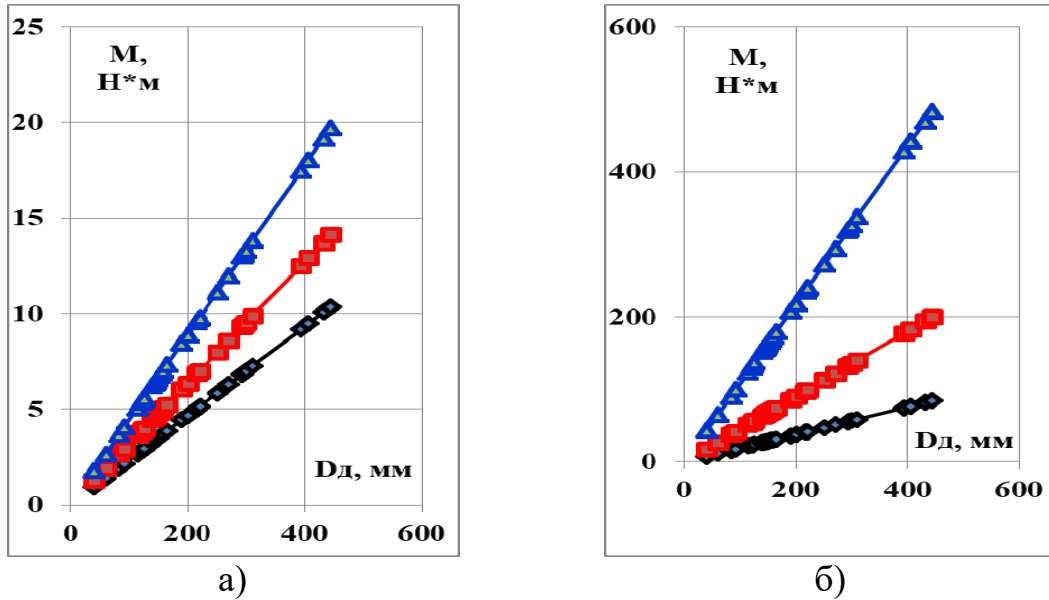
АТП Ø 13,5 мм	Глибина різання, мм							
	0,5		1,0		1,5		2,0	
	$P_{z \text{ сер.}}$ , кН	$P_{y \text{ сер.}}$ , кН	$P_{z \text{ сер.}}$ , кН	$P_{y \text{ сер.}}$ , кН	$P_{z \text{ сер.}}$ , кН	$P_{y \text{ сер.}}$ , кН	$P_{z \text{ сер.}}$ , кН	$P_{y \text{ сер.}}$ , кН
АТП нова	0,057	0,001	0,166	0,022	0,292	0,094	0,436	0,181
Результуюча сила, кН	0,058		0,167		0,306		0,472	
Питоме навантаження, кН/мм <sup>2</sup>	1,001		1,035		1,040		1,047	
Ширина сколу, мм /дов- жина шляху різання, м	7,5/1,094		10/1,129		15/1,187		20,2/1,324	
Робота, витрачена на процес різання, Дж	0,064		0,188		0,363		0,624	
Питома енергія процесу руйнування гірської породи кДж/м <sup>2</sup>	3,88		8,32		10,19		11,66	
АТП з довжиною хорди зношення 5,0 мм	0,063	0,049	0,28	0,368	0,481	0,541	0,822	0,768
Результуюча сила, кН	0,079		0,462		0,724		1,125	
Питоме навантаження, кН/мм <sup>2</sup>	0,026		0,066		0,062		0,067	
Робота, витрачена на процес різання, кНм	0,09		0,522		0,903		1,27	
АТП з довжиною хорди зношення 8,0 мм	0,096	0,056	0,578	0,546	1,454	1,303	2,07	1,766
Результуюча сила, кН	0,111		0,795		1,953		2,721	
Питоме навантаження, кН/мм <sup>2</sup>	0,025		0,085		0,130		0,133	
Робота, витрачена на процес різання, кНм	0,121		0,897		2,31		3,603	

Варто зазначити про наявність тенденції збільшення амплітуди миттєвих значень складових сил різання зі збільшенням ступеню зношення ріжучого елемента. Це дозволяє зробити припущення, щодо можливості оцінки стану озброєння породоруйнівного інструменту за характеристиками коливального процесу бурильного інструменту та миттєвими значеннями режимно-технологічних параметрів буріння.

З врахуванням отриманих значень силових параметрів для стандартних діаметрів доліт PDC визначено усереднений момент опору різання гірської породи при роботі з інструментом різного ступеня зношення (рис. 2). При цьому розглянуто одиничний різець, розташований на відстані  $0,8R_d$  від центру долота.



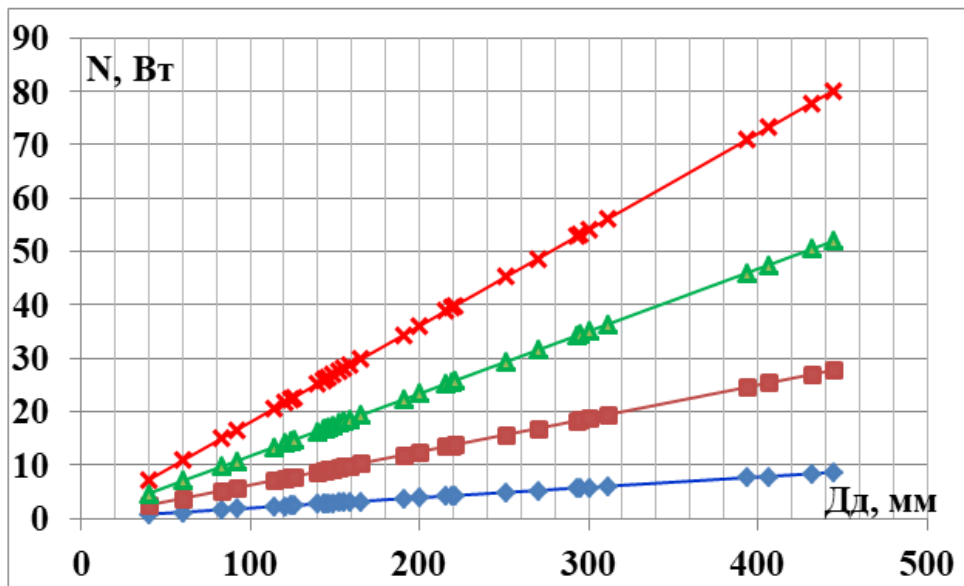
Для гострої АТП визначено потужність, яку необхідно затратити для руйнування породи (рис. 3). Так, при глибині різання  $h = 0,5$  мм величина потужності становить 0,8 Вт (діаметр долота 40 мм) та 8,6 Вт (діаметр долота 444 мм). При  $h = 2,0$  мм величина необхідної потужності складає 7,2 Вт та 80,1 Вт відповідно.



◆ – АТП гостра; ■ – хорда 5 мм; ▲ – хорда 8 мм

а) – глибина різання  $h = 0,5$  мм; б) – глибина різання  $h = 2$  мм

**Рисунок 2** – Залежність зміни усередненого моменту опору різання гірської породи при роботі з інструментом різного ступеня зношення АТП



◆ – глибина різання  $h = 0,5$  мм    ■ – глибина різання  $h = 1$  мм

▲ – глибина різання  $h = 1,5$  мм    ✕ – глибина різання  $h = 2$  мм

**Рисунок 3** – Залежність зміни усередненої потужності, необхідної для руйнування гірської породи за різних глибин різання гострою АТП

Таким чином, отримані результати вказують на необхідність регламентування зношення озброєння породоруйнівного інструменту.

У третьому розділі проведено дослідження роботи доліт ріжучо-сколюючого типу в складі бурильного інструменту за повздовжніх та крутильних коливань.

Для проведення експериментальних досліджень використано стенд, виконаний на базі бурового верстата СБА-500. При цьому здійснювалось розбурювання брил пісковика буровим різцем типу РШ-140 за різних частот обертання ( $n$ ) та осьових навантажень ( $P$ ).

Встановлено, що під час розбурювання пісковика формується вибій з характерними канавками, форма перерізу яких відповідає формі різців. При цьому кількість складових гармонік коливального процесу є кратною їх кількості. Процес супроводжується лінійним монотонним поглибленням вибою, а домінуючою в сигналі вібрації є гармоніка різання. Амплітуди поздовжніх коливань інструменту (табл. 2) з новим долотом є більшими, ніж при застосуванні долота, що містить ознаки зношення. Це зумовлено величиною заглиблення різців у породу і, відповідно, горизонтальної складової сили різання. Зношення сегментної частини різця на 1 мм спричинює зменшення амплітуди поздовжніх коливань в 1,4-1,8 рази.

**Таблиця 2** – Амплітуда коливань бурильного інструменту

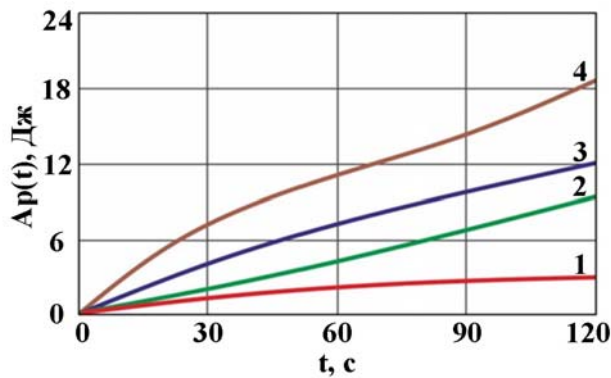
Осьове навантаження $P$ , кН	Амплітуда коливань $A$ , мм					
	$n = 82$ об/хв		$n = 131$ об/хв		$n = 181$ об/хв	
	нове	зношене	нове	зношене	нове	зношене
2	1,411	0,973	-	-	-	-
3	1,207	0,805	-	-	-	-
4	1,114	0,719	1,015	0,655	-	-
5	1,106	0,670	-	-	-	-
6	-	-	1,133	0,709	1,214	0,736
8	-	-	-	-	1,120	0,640

За результатами обробки експериментальних даних визначено роботу та потужність осьового навантаження під час руйнування вибою (табл. 3) та побудовано їх графічні залежності від часу реалізації (рис. 4).

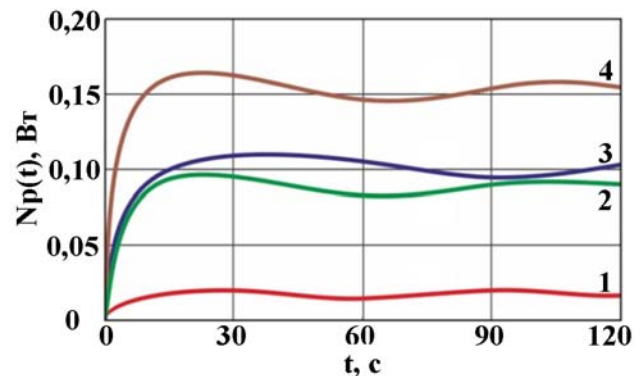
Другим основним корисним силовим фактором процесу навантажування бурильного інструменту є крутий момент. Робота осьового навантаження та крутного моменту залежать від ступеню зношення різців долота. Для врахування впливу динамічних та конструктивних параметрів бурильного інструменту на зношування озброєння долота розроблено математичну модель його поздовжніх та крутильних коливань.

**Таблиця 3** – Виконана робота та затрачена потужність на руйнування вибою

Осьове навантаження $P$ , кН	Робота $A_p$ , Дж		Потужність $N_p$ , Вт	
	нове	зношене	нове	зношене
$n = 82$ об/хв				
2	1,570	1,082	0,013	0,010
3	2,532	1,689	0,021	0,014
4	5,724	3,692	0,048	0,031
5	12,525	7,590	0,104	0,063
$n = 131$ об/хв				
4	7,688	4,960	0,064	0,041
6	9,624	6,151	0,081	0,043
$n = 181$ об/хв				
6	18,186	11,022	0,152	0,092
8	68,832	39,328	0,574	0,328



а)



б)

1 –  $P = 3$  кН,  $n = 82$  об/хв; 2 –  $P = 5$  кН,  $n = 82$  об/хв;  
 3 –  $P = 6$  кН,  $n = 131$  об/хв; 4 –  $P = 6$  кН,  $n = 181$  об/хв

**Рисунок 4** – Графічні залежності роботи (а) та потужності (б) осьового навантаження від часу реалізації процесу

Бурильний інструмент подано у вигляді двомасової механічної системи, тіла якої поєднуються пружно-дисипативними елементами. Систему навантажено осьовою силою та реактивним моментом від вибою, що мають складові різання і тертя. З використанням чотирьох узагальнених координат і їх похідних записано вирази для потенціальної та кінетичної енергії механічної системи, а також узагальнених силових факторів неконсервативного походження, що діють на неї. Отримані вирази надалі підставлено у рівняння Лагранжа II роду. Після ряду аналітичних перетворень складено систему диференціальних рівнянь руху, з якої встановлено залежність для визначення довжини активної (зношеної) частини різця  $l$  (1) та інтенсивності його спрацювання  $\xi$  (2):

$$l = \frac{2 \left[ \frac{J_2}{d^2} \ddot{x}_2 - \left( m_1 + \frac{J_2}{d^2} \right) \ddot{x}_1 + \frac{J_1}{d} \ddot{\varphi}_1 + \alpha_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \right]}{zr\sigma [1 + \text{sign}(\dot{x}_1)]} + \frac{2 \left[ k_1 (x_2 - x_1) + \frac{c_1}{d^2} (x_2 - x_1) + \frac{c_1}{d} (\varphi_1 - \varphi_3) + zr\zeta\epsilon h \right]}{zr\sigma [1 + \text{sign}(\dot{x}_1)]}; \quad (1)$$

$$\xi = \frac{4 \left[ \frac{J_2}{d} \ddot{x}_1 - \frac{J_2}{d} \ddot{x}_2 - (J_1 + J_2) \ddot{\varphi}_1 - \frac{c_1}{d} (\varphi_2 - \varphi_1) - c_1 (\varphi_1 - \varphi_3) - \frac{1}{2} zr^2 \epsilon h \right]}{zr^2 \mu l \sigma [1 + \text{sign}(\dot{x})]}. \quad (2)$$

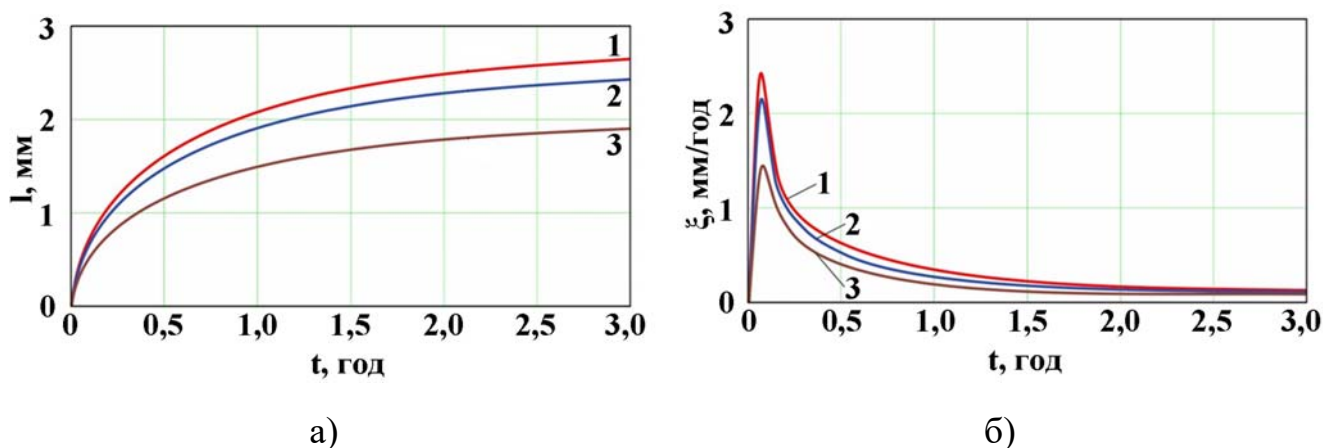
де  $m_1$  – маса долота;  $J_1$  і  $J_2$  – момент інерції долота і труби відповідно;  $x_1, x_2$  – осьові координати долота, труби;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – кутові координати долота, труби та перевідника;  $k_1$  – жорсткість різьбового з'єднання;  $\alpha_1$  – коефіцієнти різьбового з'єднання;  $c_1, d$  – жорсткість та кінематичний параметр з'єднання труби і долота з допомогою конуса Морзе;  $z$  – число різців на долоті;  $r$  – радіус долота;  $\epsilon$  – внутрішня питома енергія різання;  $\zeta$  – параметр, що визначає положення різця;  $h$  – величина поглиблення вибою різцем;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $\sigma$  – напруження руйнування.

Для досліджень спрацювання долота відносно узагальнених координат  $x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2$  достатньою є наявність закону зміни хоча б однієї з них. Одним із шляхів їх отримання є проведення експериментальних досліджень з вимірюванням осьового вібропереміщення бурильного інструменту за відповідних режимних параметрів.

Для параметрів коливального процесу, які не реєструвались в лабораторних умовах у зв'язку з відсутністю повного комплексу вимірювальної апаратури, в програмному середовищі MapleSim створено числові моделі поздовжніх та крутильних коливань бурильного інструменту. З їх використанням автоматично генеруються рівняння руху та силової взаємодії бурильного інструменту з вибоєм, що є додатковим інструментом для дослідження. Результатом числової реалізації моделей є переміщення  $s$ , швидкість  $v$ , пришвидшення  $a$  та осьова сила  $F$  при поздовжніх, а також кут повороту  $\varphi$ , кутова швидкість  $\omega$ , кутове пришвидшення  $\epsilon$  та крутний момент  $M$  при крутильних коливаннях. Отримані в результаті побудови та реалізації числових моделей поздовжніх та крутильних коливань залежності є координатами та їх похідними до отриманих аналітичних залежностей (1) та (2), з допомогою яких визначено числові значення довжини зношеної частини різця та інтенсивності його спрацювання. На основі результатів числового моделювання, а також параметрів долота та вибою, проведено дослідження зміни довжини зношеної частини (хорди) різця за таких режимних параметрів буріння:

$n = 82$  об/хв,  $P = 5$  кН;  $n = 131$  об/хв,  $P = 6$  кН;  $n = 181$  об/хв,  $P = 8$  кН. Як видно з рисунку 5 зміна довжини хорди в часі має параболічний характер. На початковому етапі експлуатації гострої АТП питоме контактне навантаження є максимальним, що спричиняє інтенсивне спрацювання її робочої поверхні.

Після 3 годин буріння новою АТП при  $n = 181$  об/хв і  $P = 8$  кН на її ріжучій частині сформовані поверхні зношення з довжиною хорди 2,7 мм, при  $n = 131$  об/хв і  $P = 6$  кН – 2,5 мм, а при  $n = 82$  об/хв і  $P = 5$  кН – 1,9 мм. Це відповідає шляху різання довжиною 271 м, 1962 м та 1228 м. Інтенсивність спрацювання є найбільшою на початку експлуатації і для трьох зазначених режимів навантаження відповідно становить 2,4 мм/год, 2,2 мм/год та 1,4 мм/год. Надалі швидкість спрацювання поступово зменшується і стабілізується.



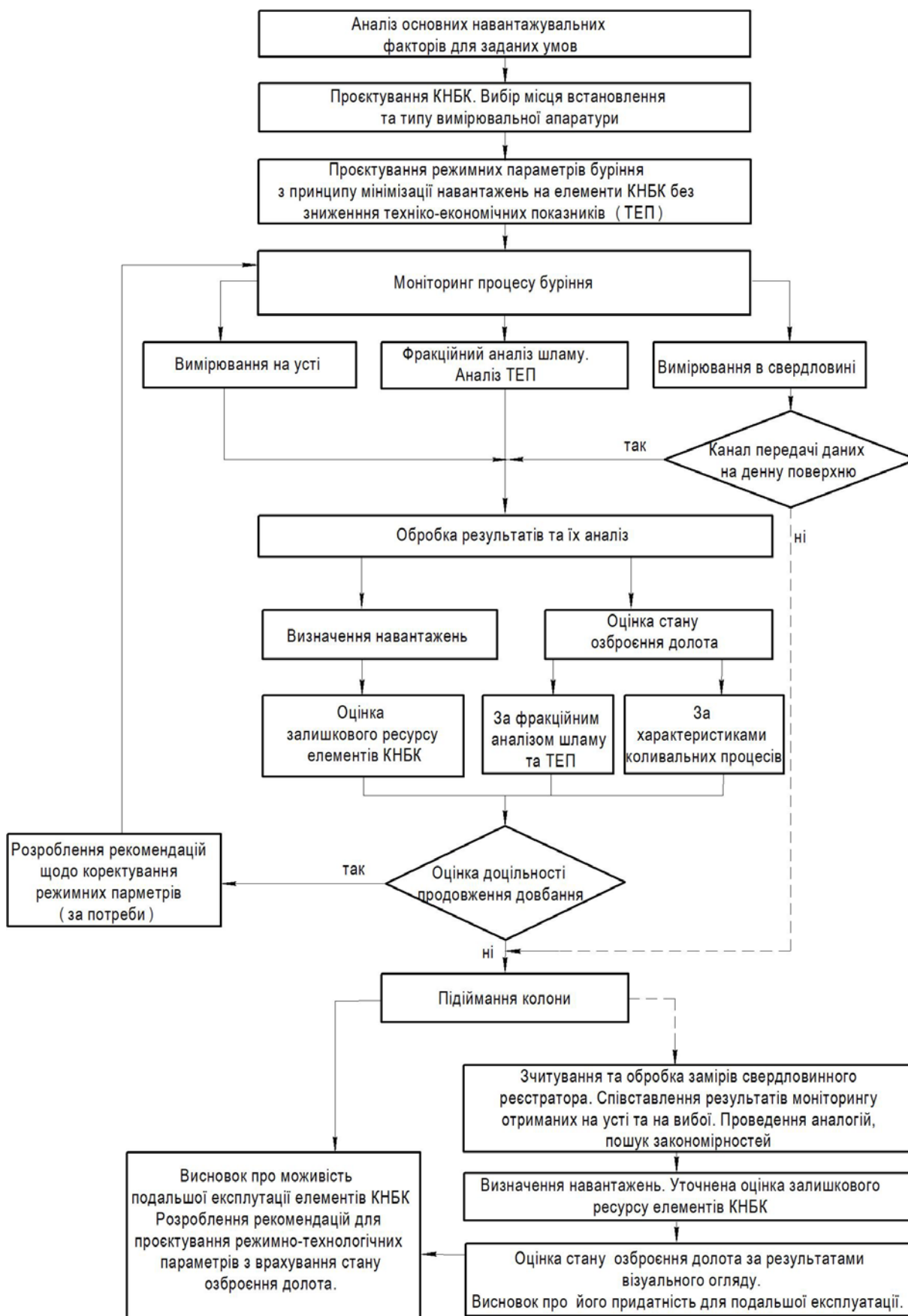
1 –  $n = 181$  об/хв,  $P = 8$  кН; 2 –  $n = 131$  об/хв,  $P = 6$  кН;  
3 –  $n = 82$  об/хв,  $P = 5$  кН

**Рисунок 5** – Залежність довжини зношеної частини (а) та інтенсивності зношування різця (б) від часу його роботи

Запропонований алгоритм підкріплений записами коливальних процесів КНБК в свердловині дозволяє моделювати динаміку спрацювання доліт з метою коригування режимно-технологічних параметрів буріння.

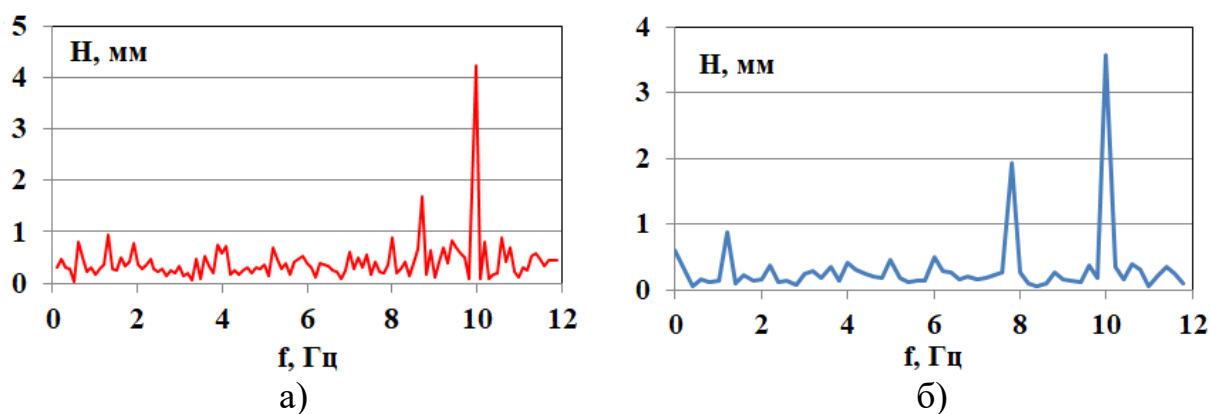
**Четвертий розділ** присвячено розробленню методу коригування режимно-технологічних параметрів буріння, а також технічних засобів для оцінювання та зниження навантаженості КНБК з метою забезпечення їх безаварійної роботи.

Розроблено метод коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК з врахуванням стану озброєння долота (рис. 6). За основу методу взято ідею постійного моніторингу режимно-технологічних параметрів буріння, силових і кінематичних характеристик, стану озброєння породоруйнівного інструменту та подальшого оцінювання їхнього взаємозв'язку і впливу на роботу КНБК. В цілому метод передбачає проектування режимно-технологічних параметрів, моніторинг в процесі буріння, а також прийняття рішень щодо ефективності ведення бурових робіт та доцільності їх продовження з використанням наявного інструменту.



**Рисунок 6** – Алгоритм методу коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК з врахуванням стану озброєння долота

Розроблено конструкцію та виготовлено дослідний зразок пристрою для вимірювання зусиль в колоні бурильних труб, що дає змогу оцінити рівень навантаженості та характер коливальних процесів КНБК. Здійснено оцінку працездатності пристрою промисловою апробацією дослідного зразка на свердловині Кадобнянська 28 ТОВ «Карпатська бурова компанія». При цьому встановлено фактичні значення згинального моменту, осьового навантаження на долото та реакції на опорно-центруючому елементі. Побудовано амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) поздовжніх коливань КНБК (рис. 7). На АЧХ виділено в якості першої інформативної ознаки величину основної гармоніки, викликаній різанням породи та додаткової гармоніки, спричиненої її стиранням. Пікові значення АЧХ для нового долота складають близько 4,3 мм на частоті 10 Гц (частота різання) та 1,8 мм – на частоті 8 Гц (частота стирання). Для частково спрацьованого долота за цих же частот їх значення, відповідно, складають 3,6 мм та 1,9 мм. Другою інформативною ознакою спрацювання долота визначено площу спектру коливань, яка для нового долота становить 5,2 мм·Гц, а для зношеного – 3,8 мм·Гц.



**Рисунок 7** – АЧХ поздовжніх коливань перерізу КНБК на початку довбання (а) – (нове долото) та наприкінці довбання (б) – (частково зношене)

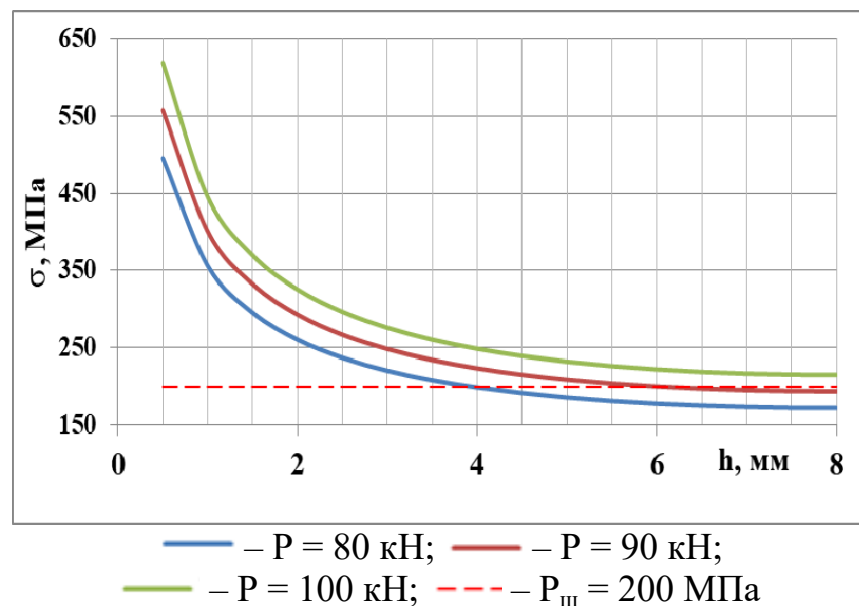
З метою оцінювання доцільності продовження буріння в наступному інтервалі без зміни режимно-технологічних параметрів та забезпечення ефективного руйнування гірської породи побудовано залежності впливу зношення ріжучих елементів долота ( $\varnothing$  16 мм) на величину питомого контактного навантаження (рис. 8). Встановлено, що для ефективного руйнування породи твердістю 200 МПа при осьовому навантаженні 80 кН необхідне контактне зусилля забезпечується за умови зношення різця по висоті не більше, ніж на 4 мм.

Отриманими результатами підтверджено працездатність пристрою та можливість його використання при реалізації запропонованого методу коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК. Встановлення фактичних значень параметрів взаємодії бурильного інструменту з вибоєм та стінками свердловини дозволяє оцінити необхідність зміни режимно-технологічних параметрів буріння та конструкцій КНБК, а також визначити період неруйнівного контролю глибинного обладнання та зменшити кількість аварій, пов'язаних із втомним руйнуванням.

Отримана інформація також дозволяє провести аналогії та здійснити оціню-



вання впливу стану озброєння долота на коливальні процеси в системі.



**Рисунок 8** – Залежність впливу висоти зношення озброєння долота на величину питомого контактного навантаження

Обґрунтовано доцільність використання для зниження навантаженості КНБК гнучкої ланки – пружної муфти. Проведено аналітичні дослідження впливу її параметрів на відхиляюче зусилля на долоті та згинальний момент в КНБК. Встановлено недоцільність використання муфт довжиною меншою, ніж 4 м. Використання пружних муфт довжиною від 4 м до 6 м та жорсткістю від  $1 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$  до  $4 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$ , разом із зміною режимних параметрів буріння дає змогу знизити величину максимального

згинального моменту в КНБК без суттєвої зміни відхиляючого зусилля на долоті.

Отримані результати підтверджують достатню достовірність та можливість використання запропонованого методу та засобів для його реалізації.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено науково-прикладну задачу, що полягає у забезпеченні ефективного руйнування гірських порід за безаварійної роботи КНБК шляхом врахуванням їх фактичної навантаженості, стану породоруйнівного інструменту та коригування режимно-технологічних параметрів буріння. Отримані автором результати теоретичних та експериментальних досліджень дають можливість зробити такі висновки:

1. За результатами аналізу літературних джерел встановлено відсутність єдиного підходу щодо реалізації технологій буріння свердловин із врахуванням стану породоруйнівного інструменту. Використання для цього дороговартісних вимірювальних комплексів не завжди є економічно виправданим. Тому існує певна інформаційна невизначеність щодо умов роботи породоруйнівного та бурильного інструменту. Через це постає завдання дослідження взаємодії долота з вибоєм свердловини та розроблення недорогих, простих і надійних в експлуатації технічних засобів для реєстрації навантаженості глибинного обладнання, а також методів для забезпечення ефективного руйнування гірських порід за безаварійної роботи КНБК.

2. Експериментально встановлено закономірності впливу ступеня зношення одиничного різця на силові та енергетичні параметри різання гірської породи. Ви-



значено, що при збільшенні глибини різання гострою АТП з 0,5 мм до 2,0 мм результуюча сила зростає у 8 разів. Збільшення ступеню зношення АТП від 0 мм до 8 мм зумовлює зростання результуючої сили в 1,9 рази при глибині різання 0,5 мм та у 5,7 рази при глибині різання 2,0 мм. Для гострої АТП енергоємність процесу руйнування породи при збільшенні глибини різання з 0,5 мм до 2,0 мм зростає у 3,1 рази. Для забезпечення ефективних режимів різання різцем з розміром хорди 8 мм необхідним є створення навантажень, що перевищує допустимі для породоруйнівного інструменту. Отримані результати вказують на необхідність регламентування зношення ріжучих елементів породоруйнівного інструменту.

3. Проведено експериментальні дослідження, в результаті яких встановлено залежність характеру коливальних процесів бурильного інструменту від режимних параметрів буріння, властивостей розбурюваної породи, а також від геометрії озброєння долота. Визначено амплітуди поздовжніх коливань бурильного інструменту за різного ступеня зношення озброєння долота. Встановлено, що зношення сегментної частини різця на 1 мм зумовлює зменшення амплітуди поздовжніх коливань в 1,4-1,8 рази. Розроблено математичну модель визначення довжини зношеної частини різця долота та інтенсивності його спрацювання при експлуатації в умовах, що характеризуються поздовжніми та крутильними коливальними процесами, і встановлено параболічний характер зміни довжини зношеної частини різця з часом.

4. Розроблено метод коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи КНБК з врахуванням стану озброєння долота. За основу методу взято ідею постійного моніторингу режимно-технологічних параметрів буріння, силових і кінематичних характеристик, стану озброєння породоруйнівного інструменту з оцінюванням їхнього взаємозв'язку та впливу на роботу КНБК. Метод передбачає проектування режимно-технологічних параметрів, моніторинг в процесі буріння, а також оцінювання ефективності ведення бурових робіт та доцільності їх продовження з використанням наявного інструменту.

5. Розроблено конструкцію пристрою для оцінки рівня навантаженості в перерізах КНБК та характеру її повздовжніх коливань. Дослідний зразок пристрою пройшов промислово апробацію, за результатами якої встановлено фактичні значення згинального моменту, осьового навантаження на долото, реакції на опорно-центруючих елементах та отримано амплітудно-частотні характеристики повздовжніх коливань компоновки.

Проведено аналітичні дослідження впливу параметрів пружної муфти на відхиляюче зусилля на долоті та максимальний згинальний момент в елементах КНБК. Встановлено, що використання пружних муфт довжиною від 4 м до 6 м та жорсткістю від  $1 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$  до  $4 \text{ кН}\cdot\text{м}^2$  разом із зміною режимних параметрів буріння забезпечує зниження максимального згинального моменту в елементах компоновки без суттєвої зміни відхиляючого зусилля на долоті. Використання пружних ланок довжиною менше 4 м є недоцільним.

### **Основний зміст роботи опублікований в наступних працях:**

1. Ivasiv V., Yurych A., Zabolotnyi S., Yurych L., Bui V., Ivasiv O. Determining the influence of the condition of rockdestroying tools on the rock cutting force. *Eastern-*

*European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №1(103). P. 15-20. (Фахове видання України включене до наукометричної бази Scopus).

2. Chudyk I., Raiter P., Grydzhuk Ya., Yurych L. Mathematical model of oscillations of a drill tool with a drill bit of cutting-scraping type. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. №1. P. 52-58. (Фахове видання України включене до наукометричної бази Scopus).

3. Чудик І. І., Гриджук Я. С., Юрич Л. Р. Оцінка затрат механічної енергії бурильної колони при роторному бурінні. *Нафтогазова енергетика*. 2018. №2(30). С. 17-24. (Фахове видання України).

4. Юрич Л. Р. Метод забезпечення експлуатаційної надійності та оцінки залишкового ресурсу елементів бурильної колони. *Молодий вчений*. 2016. №11(38). С. 54-57. (Видання України включене до наукометричної бази Index Copernicus).

5. Івасів В. М., Гриджук Я. С., Гриців В. В., Юрич Л. Р. Проблеми забезпечення експлуатаційної надійності елементів бурильних колон. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. №6/6(26). С. 41-44. (Фахове видання України включене до наукометричної бази Index Copernicus).

6. Івасів В. М., Рачкевич Р. В., Юрич А. Р., Юрич Л. Р. Використання пружних елементів для реалізації параметрів проектного профілю свердловини. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Динаміка і міцність машин*. 2015р. №57 (1166). С. 45-48. (Фахове видання України включене до наукометричної бази Index Copernicus).

7. Івасів В. М., Гриджук Я. С., Юрич Л. Р. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. №6/4(20). С. 15-17. (Фахове видання України включене до наукометричної бази Index Copernicus).

8. Юрич Л. Р. Оцінка можливості дослідження динаміки бурильного інструменту при роботі з долотами ріжучого-сколюючого типу в лабораторних умовах. *Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації (Вип.48) : матеріали міжнар. наук. інтернет-конф. м. Переяслав-Хмельницький, 25 червня 2019 р. Переяслав-Хмельницький, 2019. С. 203-205.*

9. Юрич Л. Р. Пристрій для оцінювання навантаженості елементів бурильної колони. *Машины, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р. Івано-Франківськ, 2016. С. 185-187.*

10. Івасів В. М., Гриджук Я. С., Юрич Л. Р. Аналіз причин руйнування елементів бурильної колони. *Нафтогазова освіта і наука: стан та перспективи : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. присвяченої семидесятиріччю газонафтопромислового факультету, м. Івано-Франківськ, 10-12 грудня 2014 р. Івано-Франківськ, 2014. С. 190-192.*

11. Пристрій для вимірювання зусиль в колоні бурильних труб: пат. 88307 Україна: МПК E21B 19/00. № U201311632; заявл. 02.10.2013; опубл.11.03.2014, Бюл. №5.

## АНОТАЦІЯ

**Юрич Л. Р. Удосконалення технології буріння свердловин з врахуванням стану породоруйнівного інструменту.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2021.

Експериментально досліджено закономірності впливу ступеня зношення одиничного різця на силові та енергетичні параметри різання гірської породи. Встановлено залежність амплітуди поздовжніх коливань від режимних параметрів та стану озброєння долота. Розроблено математичну модель і встановлено закономірності зміни довжини зношеної частини різця долота та інтенсивності його спрацювання в процесі роботи. Розроблено метод коригування режимно-технологічних параметрів буріння та забезпечення безаварійної роботи компоновок низу бурильної колони з врахуванням стану озброєння долота. Для його реалізації удосконалено конструкцію та виготовлено дослідний зразок пристрою, що дозволяє оцінити рівень навантаженості компоновки низу бурильної колони. Проведено аналітичні дослідження впливу жорсткісних характеристик гнучкої ланки компоновки на відхиляюче зусилля на долоті та згинальний момент.

**Ключові слова:** буріння, свердловина, гірська порода, руйнування гірських порід, долото, компоновка низу бурильної колони, навантаженість, сила різання.

## АННОТАЦИЯ

**Юрич Л. Р. Усовершенствование технологии бурения скважин с учетом состояния породоразрушающего инструмента.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.10 – бурение скважин. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2021.

Экспериментально исследованы закономерности влияния степени износа единичного резца на силовые и энергетические параметры резки горной породы. Установлена зависимость амплитуды продольных колебаний от режимных параметров и состояния вооружения долота. Разработана математическая модель и установлены закономерности изменения длины изнашиваемой части резца долота и интенсивности его износа в процессе работы. Разработан метод корректировки режимно-технологических параметров бурения и обеспечения безаварийной работы компоновок низа бурильной колонны с учетом состояния вооружения долота. Для его реализации усовершенствована конструкция и изготовлен опытный образец устройства, позволяющего оценить уровень нагруженности компоновки низа бурильной колонны. Проведены аналитические исследования влияния жестких характеристик гибкого звена компоновки на отклоняющее усилие на долоте и изгибающий момент.

**Ключевые слова:** бурение, скважина, горная порода, разрушение горных пород, долото, компоновка низа бурильной колонны, нагруженность, сила резания.

## ABSTRACT

**Yurych L. R. Improving the technology of drilling wells taking into account the state of the rock destruction tool.** – Manuscript.

Thesis for a PhD Degree in Engineering in the specialty 05.15.10 – Well drilling. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

Experimental studies of the influence of wear of PCD insert on the change of power and energy parameters of the process of cutting rocks have been carried out. The average values of the force and its components, the magnitude of the specific load, work and specific energy of the process of rock destruction are determined. It was found that an increase in the degree of wear of the plate causes an increase in the resultant force.

It was found that with an increase in the degree of wear, within the limits of the resultant force, the component aimed directly at cutting the rock decreases, and the component directed at the indentation of the cutting element increases. An increase in the resultant force leads to an increase in the value of the moment of resistance to destruction of the rock and the required power, and, accordingly, the level of loading of the BHA. An insignificant effect of the increase in the depth of cut on the value of the specific load for new inserts was revealed. For PCD with signs of wear, the specific loads are significantly lower than for sharp ones and can reach values that are insufficient for energy-efficient destruction of rocks. The results obtained provide a basis for regulating the degree of wear of cutting elements of rock destruction tools.

An experimental and theoretical study of the vibration parameters of a drilling tool equipped with a cutting-shearing type drilling bit is carried out. The dependence of the amplitude of longitudinal vibrations on the operating parameters of drilling and the state of the bit structure has been established. A decrease in the height of the worn segment part of the cutter by 1 mm causes a decrease in the amplitude of longitudinal vibrations by 1.4-1.8 times. The graphic dependences of the work and the destruction power of the bottomhole on the implementation time are determined and built.

It is proposed to assess the degree of wear of the bit structure by the indicators of changes in the instantaneous values of the operating and technological parameters of drilling and the parameters of the oscillating processes of the drilling tool.

In an analytical and numerical form, a mathematical model has been developed to determine the length of the wearing part of the bit cutter (chord), as well as the intensity of its operation for a drilling tool in conditions of longitudinal and torsional vibrations. Based on the results of the implementation of the model, the dependences of the change in the chord length and the wear rate of the cutter on the operating time and cutting path were obtained. The parabolic character of the change in the chord length was established.

A method for adjusting the operating and technological parameters of drilling and ensuring trouble-free operation of the elements of the bottom-hole assembly, taking into account the state of the bit structure has been developed. The method is based on the idea of continuous monitoring of the operating and technological parameters of drilling, force and kinematic characteristics, the state of the rock destruction tool structure and further assessment of their relationship and impact on the operation of the BHA. In gen-

eral, the method provides for the design of operating and technological parameters, monitoring during drilling, as well as making decisions on the effectiveness of drilling operations and the feasibility of continuing them using the available tool.

A design was developed and a prototype of a device for measuring forces in a drill pipe string was manufactured. The operability of the device was assessed by industrial testing of a prototype at well Kadobnianska 28, LLC “Karpatska Drilling Company”. The amplitude-frequency characteristics of the longitudinal vibrations of the assembly are constructed and the value of the fundamental harmonic caused by the cutting of the rock and the additional harmonic caused by its wear is highlighted as the first informative indicator. The second informative sign of bit wear was determined by the area of the vibration spectrum.

The expediency of using a flexible link – an elastic coupling to reduce the BHA loading – has been substantiated. Analytical studies of the influence of its parameters on the deflection force on the bit and the bending moment in the assembly elements have been carried out. The inexpediency of using couplings with a length of less than 4 m has been established. The use of elastic couplings with a length of 4-6 m and a stiffness of 1-4 kN·m<sup>2</sup>, together with a change in the operating parameters of drilling, makes it possible to reduce the value of the maximum bending moment in the BHA without a significant change in the deflecting force on the bit.

**Key words:** drilling, well, rock, rock destruction, bit, bottom hole assembly, loading, cutting force.