

Визначення впливу стану породоруйнівного інструменту на силу різання породи

В. М. Івасів, А. Р. Юрич, С. Д. Заболотний, Л. Р. Юрич, В. В. Буй, О. В. Івасів

На сьогодні найуживанішим при проведенні бурових робіт є породоруйнівний інструмент, оснащений ріжучими елементами з полікристалічних алмазів (PDC) та алмазно-твердосплавними пластинами (АТП). Для нього є актуальними дослідження впливу ступеню зношення ріжучих елементів на силові та енергетичні параметри процесу руйнування гірської породи. З метою визначення цього впливу, в лабораторних умовах проведено експериментальні дослідження процесу різання одиничним різцем. Визначено середні значення складових сили різання (колової (P_z) та нормальної (P_y)) при глибинах різання 0,5; 1,0; 1,5; та 2,0 мм за різного ступеню зношення ріжучого елемента (листка 0, 5,0 та 8,0 мм). Встановлено величину роботи різання та питомої енергії руйнування гірської породи. При глибині різання 0,5 мм зі збільшенням ступеню зношення ріжучого елемента (від 0 до 8 мм) величина роботи зростає від 0,06376 до 0,121 Н·м. При глибині різання 2,0 мм – величина роботи зростає від 0,624 до 3,603 Н·м. Енергоємність процесу руйнування породи при збільшенні глибини різання з 0,5 до 2,0 мм для гострого різця зростає з 3,88 кДж/м² до 11,66 кДж/м². За результатами досліджень побудовані графічні залежності усереднених значень складових сили різання та її нормальної складової (P_y) від глибини різання та ступеню зношення ріжучого елемента. Одержані результати показали суттєвий вплив розміру лиски зношування на зростання силових параметрів процесу, що є підставою для регламентування ступеню зношення ріжучих елементів в процесі буріння. Визначена тенденція зростання результуючої сили та питомої роботи різання гірської породи ріжучим елементом зі збільшенням ступеню зношення. Це дає можливість за показниками коливань миттєвих значень сили при бурінні свердловин або за зміною потужності визначати ступінь зношення ріжучих елементів та передбачати ймовірність їх руйнування

Ключові слова: руйнування гірської породи при бурінні, буріння свердловин, долота PDC, сила різання

1. Вступ

Подальший розвиток нафтогазовидобувної промисловості характеризується зростанням обсягів буріння свердловин [1–3]. При цьому фахівці науковці та практики вирішують низку важливих задач щодо забезпечення траєкторії свердловини [4], високих техніко-економічних показників [5] і безпечних умов буріння [6], а також надійності бурового обладнання [7]. Значну увагу приділяють питанням взаємодії породоруйнівного інструменту з гірською породою та її ефективного руйнування. Нового поштовху ці дослідження набули із залучен-

ням до промислової експлуатації доліт, оснащених ріжучими елементами з полікристалічних алмазів (PDC) та алмазно-твердосплавними пластинами (АТП). Особливо актуальними є дослідження впливу ступеню зношення ріжучого елемента на зміну силових та енергетичних параметрів процесу руйнування породи. Адаптація озброєння породоруйнівного інструменту суттєво змінює механізм руйнування гірської породи і знижує техніко-економічні показники буріння в цілому.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботах [8, 9] наведено широкий огляд досліджень щодо розподілу температури, сил та напружень, що виникають при різанні. Також розглянуті питання ефективності роботи ріжучих елементів, механізму руйнування гірських порід, теорії різання, зношування та причин відмов породоруйнівного інструменту. Здійснено порівняння теорії різання металу і теорії різання порід та зроблено акцент на подібності цих процесів. В значній мірі роботи є оглядово-теоретичними, але дають можливість оцінити стан та перспективи вирішення проблеми забезпечення ефективного руйнування гірських порід. Зокрема відзначається необхідність проведення різнопланових досліджень з аналізом промислового матеріалу, проведенням аналітичного та експериментального моделювання процесів, розробленням ріжучих елементів нових типів і конструкцій на основі новітніх матеріалів.

Зазначені вище напрямки досліджень знайшли своє відображення в інших наукових роботах. Оцінка роботи PDC доліт за результатами їх відпрацювання та пропозиції щодо підвищення ефективності наведено в роботі [10]. Критеріями оцінки слугували середні значення проходки, механічної швидкості та часу буріння. Для розглянутих доліт запропоновано збільшення запасу озброєння, кількість лопатей та зменшення діаметру ріжучих елементів. Відзначається, що для підтвердження доцільності запропонованих проектних рішень необхідним є проведення ряду аналітичних, а надалі експериментальних досліджень. У роботах такого плану метою є адаптація доліт до застосування у певних геолого-технічних умовах буріння. Тому детально не розглядаються особливості силової взаємодії породоруйнівного інструменту з вибоєм.

Оскільки показники роботи доліт суттєво залежать від схеми розташування та геометричних параметрів озброєння, багато робіт присвячено визначенню цих питань. Так, в роботі [11] на основі аналітичних досліджень отримані залежності для визначення глибини та опору різанню-сколюванню. Для досліджуваних ріжучих елементів запропоновано методику вибору їх параметрів та схем встановлення. Подальшими дослідженнями [12] встановлено причини погіршення процесу різання-сколювання при розвороті під невеликим кутом ріжучих елементів в долоті. Розроблено рекомендації щодо застосування модуля переднього кута в залежності від розміщення ріжучого елемента відносно осі долота. Отримано емпіричні залежності сили реакції породи від осьової і тангенціальною складових при постійному передньому куті різання. Відзначено вплив високих частот обертання бурильної колони на інтенсивність вібрації, що призводять до відколів АТП. В ході проведення аналітичних досліджень розг-

лядались типові циліндричні різці PDC без ознак зношення. Це ймовірно пов'язано з суттєвим ускладненням розрахункової схеми процесу різання та аналітичного визначення його силових параметрів.

Окремі із параметрів які характеризують процес руйнування не можуть бути встановлені аналітично. У зв'язку з цим поширеними є лабораторні експериментальні дослідження руйнування породи різцями різної форми та типів. Так, вивченню робочих характеристик циліндричного різця PDC, зокрема кута тертя, потужності різання, затраченої енергії на руйнування присвячена робота [13]. Головною особливістю цієї роботи є виконання досліджень як у повітрі, так і в середовищі бурового розчину. При цьому, незважаючи на технічну можливість визначення впливу стану озброєння на параметри різання, дослідження в зазначеному напрямку не проводились.

З розвитком цифрових та комп'ютерних технологій широкого розповсюдження набули дослідження з використанням імітаційного моделювання. Так, в роботі [14] досліджено взаємодії з породою алмазного ріжучого елемента нового типу (3-RDE). Отримано тривимірну (3D) модель динамічного розриву гірських порід ріжучим елементом типу 3-RDE. Вивчено відмінності механізму руйнування гірських порід 3-RDE та циліндричними ріжучими елементами. Також проаналізовано вплив глибини різання, кута повороту та властивостей породи на руйнування гірської породи.

Згадані вище дослідження та отримані результати є лише невеликою частиною робіт, що стосується питань підвищення ефективності різців та доліт PDC. Докладено багато зусиль для розуміння взаємодії «різець – порода» і пов'язаних з нею явищ, для розроблення нових конструкцій ріжучих елементів і доліт. Оскільки продуктивність доліт PDC в процесі буріння є сукупним результатом роботи окремих різців, дослідження спрямовані на підвищення їх ефективності в лабораторних умовах зазвичай починається з вивчення поведінки одиничного різця. Основна увага приділяється: тертю і теплообміну під час взаємодія різця і породи, оптимізації, розрахунку геометричних параметрів різців PDC, в тому числі їх просторовому розподілу, моніторингу і управлінню процесом різання породи.

При цьому не береться до уваги зміна характеристик різців у взаємозв'язку із ступенем їх зношення. Зважаючи на це, дослідження, спрямовані на виявлення впливу стану ріжучих елементів породоруйнівного інструменту на силові параметри різання та шляхи дотримання їх в допустимих межах, є перспективними. Отримані результати ймовірно слугуватимуть зниженню вартості спорудження свердловин, шляхом оптимального відпрацювання доліт.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є визначення впливу ступеню зношення різця АТП на зміну силових та енергетичних параметрів процесу різання гірської породи. Це дасть додаткову можливість оцінювання стану озброєння долота, а також забезпечити нормальні умови роботи бурового обладнання в цілому, шляхом коригування режимних параметрів буріння.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- здійснити планування та провести експериментальні дослідження з параметрами характерними процесу буріння;
- здійснити обробку експериментальних даних та побудувати залежності параметрів різання за різних ступенів зношення ріжучого елемента;
- розглянути варіанти можливості оцінки стану породоруйнівного інструменту в процесі буріння.

4. Експериментальні дослідження впливу ступеню зношення АТП на параметри різання породи

4. 1. Матеріали та обладнання

Експериментальні дослідження виконувались на блоках абразивного пісковику Теревольянського родовища, середня міцність при стиску якого складає 86,8 МПа, а модуль пружності $E=14300$ МПа.

Дослідження проводилися на експериментальному стенді, створеному на основі токарно-карусельного верстата 1М552. Стенд укомплектований тривимірним динамометром, конструкція якого захищена патентом України [15]. Динамометр дозволяє одночасно вимірювати із частотою у смузі 0–500 Гц три складові зусилля різання: P_z (колова) до 100 кН, P_y (нормальна) та P_x (радіальна) до 50 кН. Складова зусилля P_y сприймається давачем сили, закріпленим на внутрішній торцевій поверхні корпусу. Коефіцієнт тертя, що враховує втрати в підшипниковій підвісці, складає 0,0015–0,0020. Таким чином, втрати не перевищують 0,2 % величини складової P_y . Складові зусилля різання P_z і P_x реєструються встановленими у двох взаємно перпендикулярних напрямках чотирма давачами. У зоні контакту адаптерів давачів з валом можливі втрати за рахунок сил тертя, що становлять 0,03–0,07 від величини зусиль. У зв'язку із цим передбачено внесення необхідних виправлень, за результатами таруванням. Втрати й взаємовплив складових сили різання не перевищували 1–2 % абсолютних значень зусилля різання.

Для вимірювання складових зусилля різання застосовані давачі U3 (до 100 кН) та C9B (до 50 кН) виробництва фірми Hottinger Baldwin Messtechnik (ФРН). Для вимірювання й реєстрації складових сил різання використовувалась система фірми Werktoff Prufmaschinen Service (Німеччина), сертифікована відповідно до міжнародного стандарту ISO 9000. Система, крім давачів сили, включає пристрій збору й перетворення інформації (Spider) та програмне забезпечення для реєстрації й обробки результатів вимірів.

АТП [16] за своєю конструкцією є двошаровими пластини діаметром 13,5 мм і висотою 3,5 мм, один шар яких висотою 0,5–0,8 мм є алмазним полікристалом, а інший – основою з твердого сплаву (рис. 1, а, б). Основна експлуатаційна характеристика АТП – зносостійкість алмазовмісного шару пластини. Буріння свердловин в складеними міцними і абразивними гірськими породами розрізах призводить до інтенсивного зношування АТП та вимагає збільшення загальної прикладеної до ріжучого елемента сили.

З метою імітації роботи ріжучих елементів на різних етапах зношування на АТП виконані лиски розміром 5,0 та 8,0 мм (рис. 1, в, г)

В ході проведення досліджень застосовувалися АТП, що є складовими різця РШ-140.

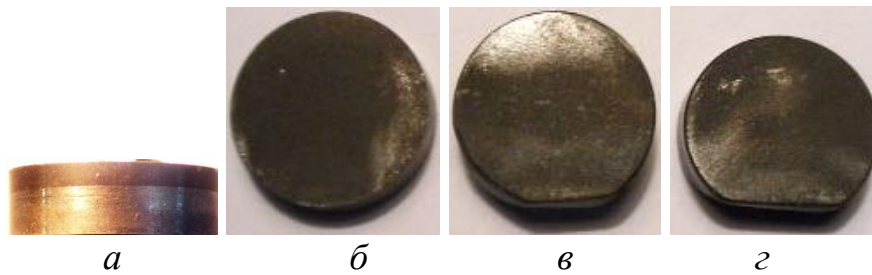


Рис. 1. Загальний вигляд алмазно-твердосплавної пластини (АТП): *а, б* – нової; *в* – з довжиною лиски (хорди) 5,0; *г* – з довжиною лиски (хорди) 8,0 мм

4. 2. Методика проведення досліджень процесу руйнування міцних гірських порід

Перед випробуваннями поверхня блоку пісковика планувалась різцем до стану однорідної рівної площини.

Основними техніко-економічними показниками застосування доліт є механічна швидкість буріння (м/год), проходка на долото (м) та вартість буріння 1 метра свердловини (грн /м). Тому при імітації буріння різцем РШ-140 прийняті параметри дослідження, характерні для процесу буріння свердловин (шпурів) із їх застосуванням:

- а) глибина різання (на оберт планшайби верстата) 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм;
- б) швидкість переміщення ріжучого елемента по блоку 0,523–0,561 м/с.

Глибина різання вибрана за результатами проведеного огляду в області досліджень механізму руйнування міцних гірських порід і створення ефективного бурового інструмента. Встановлено, що для руйнування гірських порід подача на оберт інструмента повинна становити не менше 0,3 мм. При меншій подачі процес руйнування здійснюється в режимі малоефективного поверхневого стирання.

Швидкість переміщення визначена розрахунковим шляхом з врахуванням технічних характеристик експериментальної установки.

В ході проведення досліджень здійснювався запис складових сили різання в цифровому вигляді. На їх основі визначались мінімальні, максимальні й середні значення складових сили та тривалість часу різання. Також визначено витрачену роботи на процес різання та питому енергію процесу руйнування гірської породи.

Порівняльний аналіз геометричних параметрів продуктів руйнування виконували на основі вивчення отриманих при різанні фрагментів шламу.

5. Обробка експериментальних даних та побудова графічних залежностей

Отримані в ході досліджень результати візуалізовані на діаграмі (рис. 2), яка відображає вплив зношування змодельованого лисками шириною 5,0; 8,0 та 0 мм при глибині різання 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм на зміну складових сили різання (P_z та P_y).

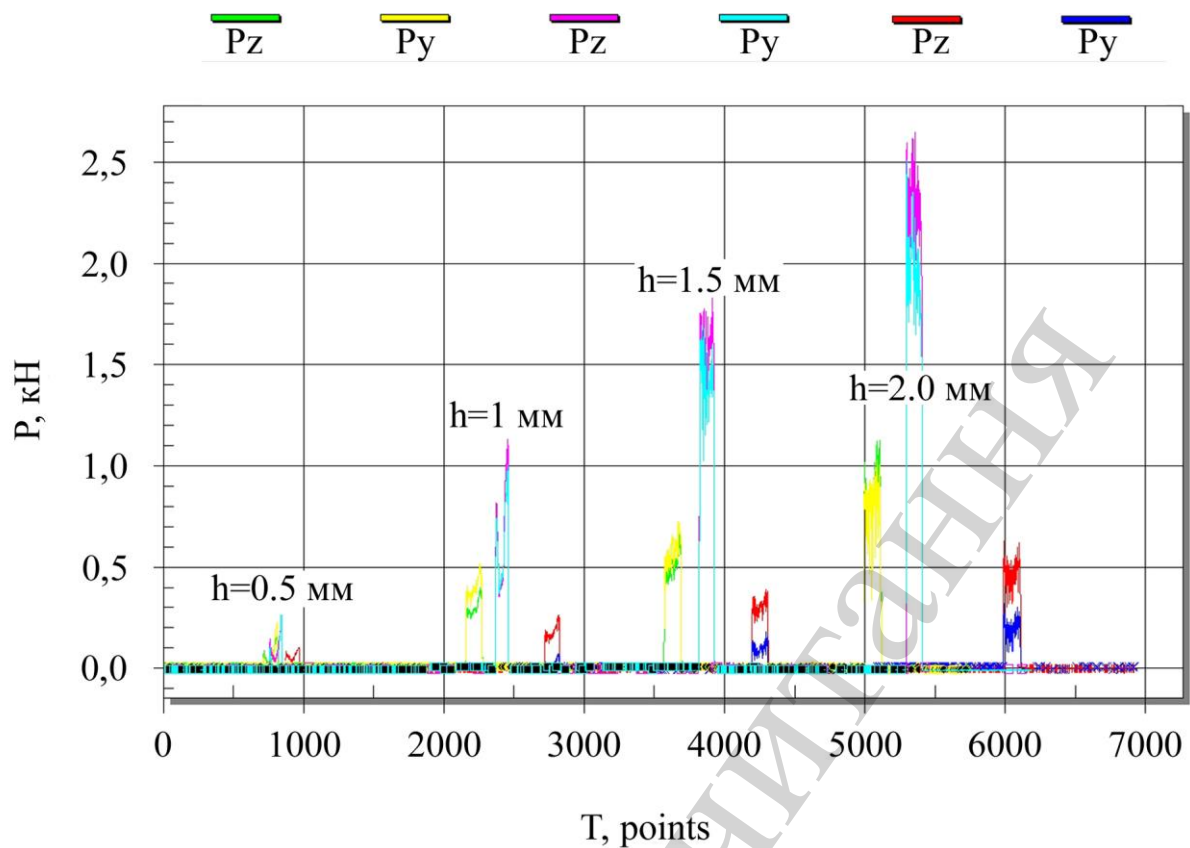


Рис. 2. Результати досліджень впливу ширини лиски зношування 5,0; 8,0 та 0 мм на зміну складових сили різання (P_z та P_y) при глибині різання 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм

На рис. 3 відображений загальний вигляд слідів різання на поверхні блоку за різних глибин різання 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм.



Рис. 3. Загальний вигляд слідів на поверхні блоку за різних глибин різання 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм

З наведеної на рис. 2 діаграми вирізано окремі фрагменти, які відповідають глибинам різання від 0,5 до 2,0 мм. На їх основі встановлено основні параметри різання (табл. 1).

Таблиця 1
Результати експериментальних досліджень

АТП Ø 13,5 мм	Глибина різання, мм							
	0,5		1,0		1,5		2,0	
	P_z сер., кН	P_y сер., кН	P_z сер., кН	P_y сер., кН	P_z сер., кН	P_y сер., кН	P_z сер., кН	P_y сер., кН
Лиска 0, мм	0,057 03	0,001 2	0,165 64	0,021 64	0,291 59	0,093 629	0,435 93	0,18 1489
Результуюча сила, кН	0,0583		0,167		0,306		0,472	
Ширина сколу, мм/довжина шляху різання, м	7,5/1,094		10/1,129		15/1,187		20,2/1,324	
Робота витрачена на процес різання, Нм	0,06376		0,188		0,363		0,624	
Питома енергія процесу руйнування гірської породи кДж/м ²	3,88		8,32		10,19		11,66	
Лиска 5, мм	0,062 51	0,048 96	0,280 268	0,367 524	0,481 051	0,540 773	0,822 301	0,76 7591
Рез.сил.,кН	0,0794		0,46219		0,7237		1,1249	
Робота витрачена на процес різання, кНм	0,0896		0,5218		0,9034		1,27	
Лиска 8мм	0,095 63	0,056 43	0,577 8	0,546	1,453 98	1,303 47	2,069 78	1,76 64
Рез.сил.,кН	0,111		0,7949		1,953		2,721	
Робота витрачена на процес різання, кНм	0,121		0,897		2,31		3,603	

За результатами обробки побудовані графічні залежності зміни усереднених значень складових сили різання (P_z та P_y) (рис. 4), залежність зміни P_y від глибини різання та ступеню зношення АТП (рис. 5).

Шляхом виділення та співставлення значень, що відповідають характерним ділянкам узагальнюючого графіка (рис. 2), побудовано залежності зміни миттєвих значень складових сили різання за різного ступеня зношення ріжучого елемента (рис. 6).

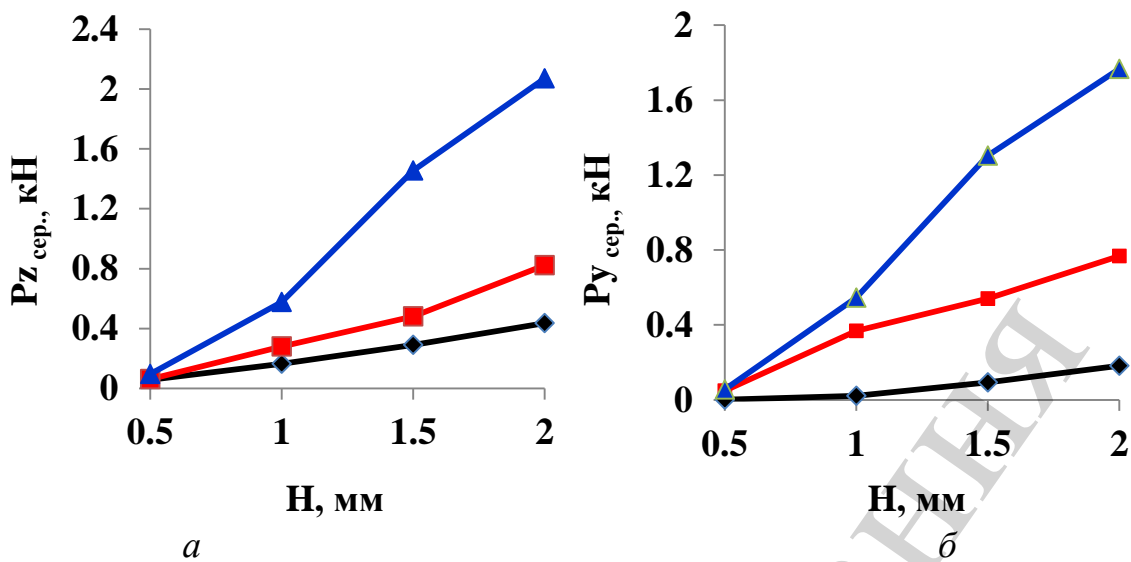


Рис. 4. Залежність зміни усереднених значень складових сили різання від глибини різання та ступеню зношення АТП: *a* – складова P_z ; *б* – складова P_y ; ◆ – АТП гостра; ■ – лиска 5 мм; ▲ – лиска 8 мм

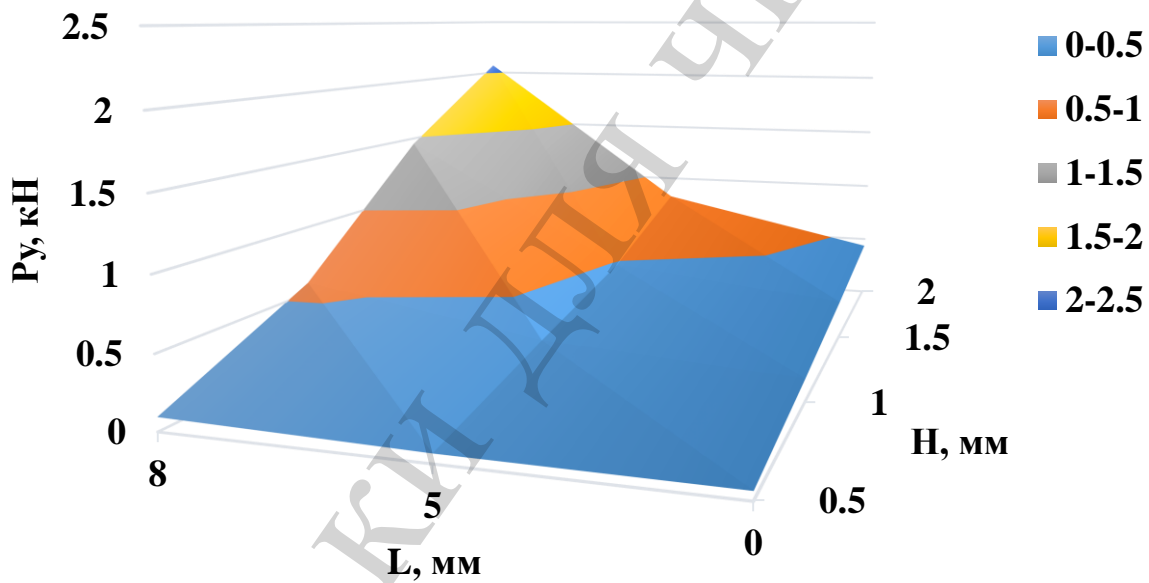
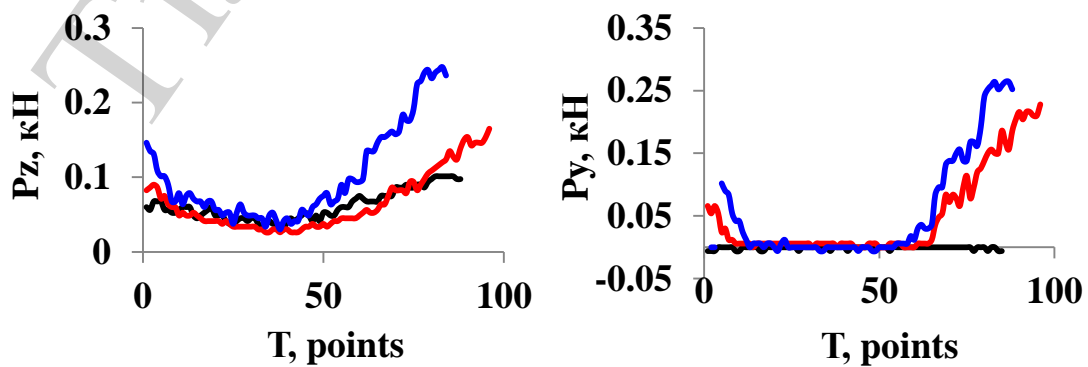


Рис. 5. Залежність зміни складової P_y від глибини різання (H) та ступеню зношення АТП (L)



a

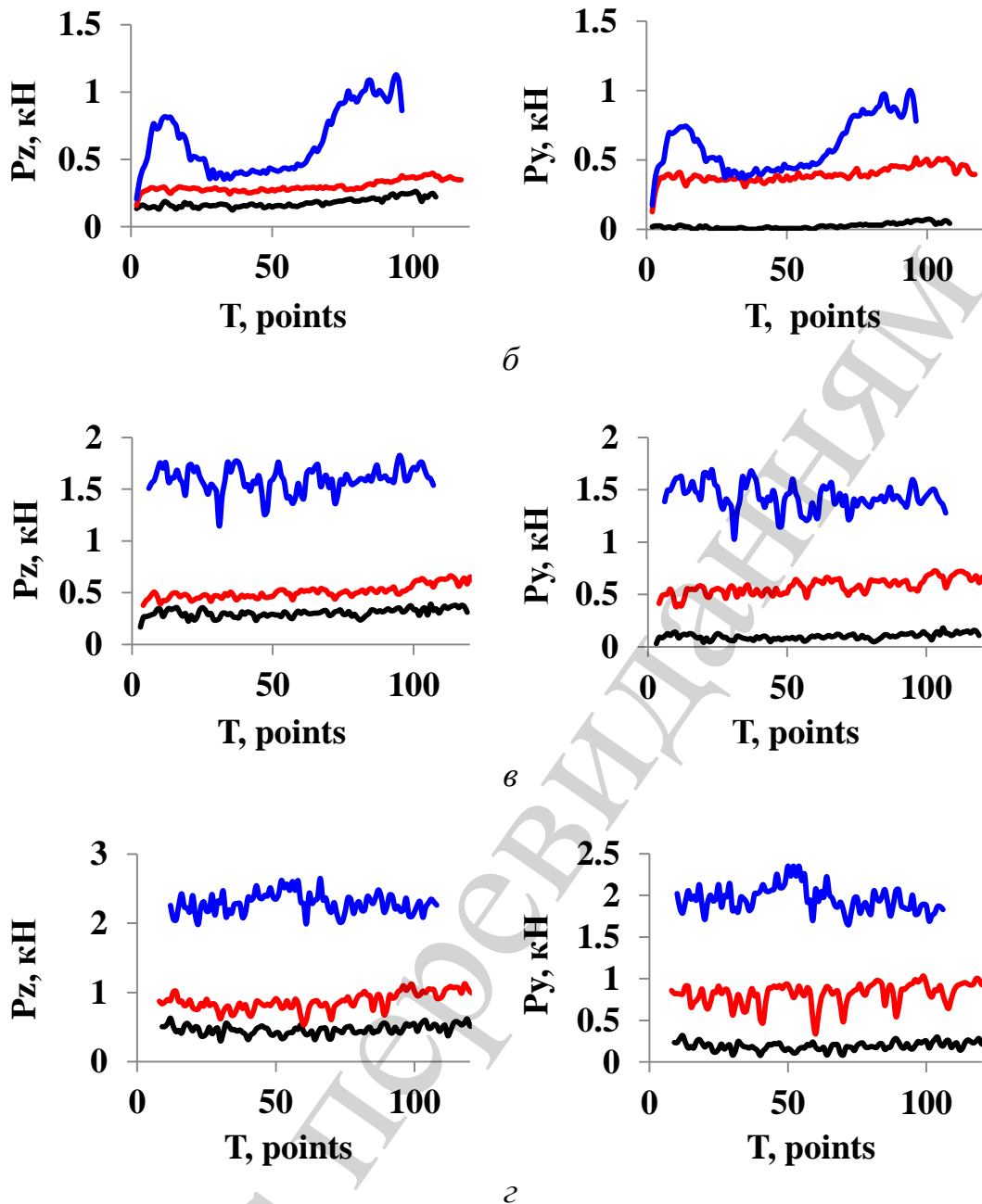


Рис. 6. Зміна миттєвих значень складових сили різання (P_z та P_y) при роботі з інструментом різного ступеня зношення: а – глибина різання 0,5 мм; б – глибина різання 1 мм; в – глибина різання 1,5 мм; г – глибина різання 2 мм; — – АТП гостра; — — лиска 5 мм; — — лиска 8 мм

Як видно з рис. 6 складова сили P_y для гострої АТП при глибинах різання 0,5–1 мм має суттєво менші значення, ніж P_z . При збільшенні глибини різання складова сили P_y набуває співрозмірних складовій P_z значень. Для ріжучого елемента з ознаками зношення величини складових сили різання є співрозмірними за усіх глибин.

6. Обговорення результатів дослідження впливу ступеня зношення ріжучого елемента на параметри різання

Як видно з отриманих результатів (табл. 1), при збільшенні глибини різання круглою АТП (тобто гострою) з 0,5 до 2,0 мм результуюча сила зростає у 8 разів. Збільшення ступеню зношення АТП (розміру лиски від 0 до 8 мм) зумовлює зростання результуючої сили. Так при глибині різання 0,5 мм результуюча сила зростає в 1,9 рази. В той же час одночасна зміна ступеню зношування АТП (розміру лиски від 0 до 8 мм) та глибини різання до 2,0 мм, призводить до зростання результуючої сили у 46,7 рази.

За результатами аналізу фрагментів шламу встановлено, що при заглибленні АТП відкол фрагмента породи відбувається дискретно (стрибкоподібно – рис. 3). При цьому об'єм фрагмента, що сколюється, на відміну від співвідношення об'ємів зони виколу та змінання під дією ударного заглиблення твердосплавної вставки, є більшим зони змінання. При глибині різання 2 мм для різця АТП максимальне значення співвідношення досягає 5,2 рази (рис. 3).

Для гострої АТП (без ознак зношування) енергоємність процесу руйнування породи при збільшенні глибини різання з 0,5 до 2,0 мм зростає у 3,08 рази (табл. 1). Це зумовлено суттєвим збільшенням роботи руйнування породи АТП (у 9,8 рази) й площі поверхні сколів (в 3,7 рази). Слід зазначити, що при різанні на глибину 2,0 мм різцем з розміром лиски 8 мм результуюча сила на один ріжучий елемент досягає 2,721 кН. Таким чином, загальне зусилля на різець РШ-140 з чотирма ріжучими АТП повинно досягати 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 напружень, та як наслідок імовірності руйнування її елементів, отримані результати дають підставу регламентувати ступінь зношення ріжучих елементів породоруйнівного інструменту.

Інтерпретуючи отримані результати на процес роботи породоруйнівного інструменту очевидним є зменшення, в межах результуючої сили, складової спрямованої безпосередньо на різання породи. При цьому збільшується складова спрямована на вдавлювання ріжучого елемента (табл. 1). Так, при глибині різання 0,5 мм для гострої АТП результуюча сила складає 0,0583 кН, а складова $P_{y, \text{ср.}} = 0,0012$ кН. В той же час, для зношеної АТП (листка 8 мм) при результуючій силі 0,111 кН, складова $P_{y, \text{ср.}} = 0,05643$ кН.

З іншого сторони, при збільшенні глибини різання круглою АТП (тобто гострою) з 0,5 до 2,0 мм складова сили P_y зростає у більше як 150 разів. Збільшення ступеню зношування АТП (розміру лиски від 0 до 8 мм) за постійної глибини різання 0,5 мм зумовлює зростання складової сили у 56 разів.

При проведенні бурових робіт осьове навантаження на долото регламентується в певному діапазоні значень. Створення близьких до максимальних значень діапазону навантажень при використанні нового породоруйнівного інструменту, зумовлюватиме виникнення його інтенсивних коливань в режимі «stick slip». Зважаючи на це, варто при проектуванні режимних параметрів буріння планувати гнучку програму навантаження на долото, в залежності від стану його озброєння. Приймати мінімально необхідне для реалізації техніко-

технологічного завдання навантаження для нового долота. По мірі спрацювання озброєння навантаження слід збільшувати. Така програма дасть змогу зменшити імовірність виникнення коливань долота в режимі «stick slip». Це знизить крутні та повздовжні навантаження на бурильну колону і сприятиме збільшенню довговічності її елементів.

Варто відзначити, що зі зміною ступеню зношення ріжучого елемента змінюється амплітуда та частота коливань миттєвих значень складових сил різання (рис. 6). Це дає підстави припустити можливість оцінки стану озброєння породоруйнівного інструменту за характеристиками коливного процесу бурильного інструменту та передбачати ймовірність його руйнування.

З метою підтвердження та розвитку гіпотези контролю за станом породоруйнівного інструменту, на основі моніторингу коливань бурового снаряду та силових параметрів різання, необхідно провести експериментальні дослідження з використанням промислових типорозмірів породоруйнівного інструменту.

7. Висновки

1. Проведені експериментальні випробування різців, оснащених алмазно-твердо-сплавними пластинами з лисками різного розміру, які дозволяють моделювати вплив зношення АТП на зміну силових параметрів процесу різання гірської породи. Дослідження проводились за характерних для процесу буріння свердловин (шпурів) із застосуванням різців РШ-140 параметрів: глибина різання 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 мм; лінійна швидкість різання 0,523–0,561 м/с. За їх результатами отримано запис складових сили різання в цифровому вигляді.

2. Визначено середні значення складових сили, величину витраченої роботи на процес різання та питомої енергії процесу руйнування гірської породи. Зокрема, при глибині різання 0,5 мм зі збільшенням ступеню зношення АТП (розміру лиски від 0 до 8 мм) величини зазначених параметрів змінюються в наступних діапазонах: $P_{z\text{сер.}}=0,05703\text{--}0,09563$ кН, $P_{y\text{сер.}}=0,0012\text{--}0,05643$ кН, $A=0,06376\text{--}0,121$ Нм. Енергоємність процесу руйнування породи при збільшенні глибини різання з 0,5 до 2,0 мм, для гострої АТП (без ознак зношення), зростає з 3,88 кДж/м² до 11,66 кДж/м²

Отримано графічні залежності зміни усереднених значень складових сили різання та складової P_y від глибини різання та ступеню зношення АТП.

3. Встановлено суттєвий вплив ступеню зношення ріжучих елементів на зростання силових параметрів процесу. Зі збільшенням ступеня зношення зменшується, в межах результуючої сили, складова спрямована безпосередньо на різання породи. При цьому збільшується складова спрямована на вдавлювання ріжучого елемента. При глибині різання 0,5мм для гострої АТП результуюча сила складає 0,0583 кН, а складова $P_{y\text{сер.}}=0,0012$ кН. В той же час, для зношеної АТП (листка 8 мм) при результуючій силі 0,111 кН, складова $P_{y\text{сер.}}=0,05643$ кН.

Визначена тенденція збільшення результуючої сили та питомої роботи різання гірської породи зі зростанням ступеня зношення. Це дає змогу за показниками коливань миттєвих значень сили на снаряд при бурінні свердловин або по зміні потужності (по ватметру) встановити ступінь зношення різця та передбачати ймовірність його руйнування.

Література

1. Beaudoin, Y. C., Dallimore, S. R., Boswell, R. (Eds.) (2014). Frozen Heat: A UNEP Global Outlook on Methane Gas Hydrates. Vol. 2. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
2. Organization of the Petroleum Exporting Countries (2017). OPEC. Annual Statistical Bulletin. URL: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2017_13062017.pdf
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність. Кабінет Міністрів України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456>
4. Ивасив, В. М., Рачкевич, Р. В., Юрыч, А. Р., Козлов, А. А., Юрыч, Л. Р. (2016). Использование упругих элементов для управления траекторией скважины. Нефтяное хозяйство, 2, 36–37.
5. Grydzhuk, J., Chudyk, I., Velychkovych, A., Andrusyak, A. (2019). Analytical estimation of inertial properties of the curved rotating section in a drill string. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (7 (97)), 6–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154827>
6. Rachkevich, R. V. (2014). In-Plane Bending of a Drill String During its Compression in a Horizontal Borehole. Strength of Materials, 46 (6), 843–847. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-014-9618-7>
7. Biletsky, V., Vitryk, V., Mishchuk, Y., Fyk, M., Dzhus, A., Kovalchuk, J. et. al. (2018). Examining the current of drilling mud in a power section of the screw down-hole motor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (92)), 41–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126230>
8. Che, D., Han, P., Guo, P., Ehmann, K. (2012). Issues in Polycrystalline Diamond Compact Cutter–Rock Interaction From a Metal Machining Point of View – Part I: Temperature, Stresses, and Forces. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 134 (6). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4007468>
9. Che, D., Han, P., Guo, P., Ehmann, K. (2012). Issues in Polycrystalline Diamond Compact Cutter–Rock Interaction From a Metal Machining Point of View – Part II: Bit Performance and Rock Cutting Mechanics. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 134 (6). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4007623>
10. Зайцев, В. И., Карпиков, А. В., Осипов, В. Г. (2016). Применение долот PDC на месторождениях Восточной и Западной Сибири. Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН, 4, 62–69. doi: <https://doi.org/10.21285/0130-108x-2016-57-4-62-69>
11. Нескоромных, В. В., Борисов, К. И., Пушмин, П. С. (2013). Аналитическое исследование установившейся глубины резания-скальвания при разрушении породы резцами PDC. Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН, 2, 78–85.
12. Зайцев, В. И., Карпиков, А. В., Че, В. В. (2014). Эффективность использования долот PDC. Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН, 5 (48), 58–66.

13. Xiao, H., Liu, S., Tan, K. (2019). Experimental Investigation of Force Response, Efficiency, and Wear Behaviors of Polycrystalline Diamond Rock Cutters. *Applied Sciences*, 9 (15), 3059. doi: <https://doi.org/10.3390/app9153059>

14. Liu, J., Zheng, H., Kuang, Y., Xie, H., Qin, C. (2019). 3D Numerical Simulation of Rock Cutting of an Innovative Non-Planar Face PDC Cutter and Experimental Verification. *Applied Sciences*, 9 (20), 4372. doi: <https://doi.org/10.3390/app9204372>

15. Майстренко, А. Л., Вировець, Л. М., Склярів, Е. Д., Заболотний, С. Д., Свешніков, І. А. (2005). Пат. № 11407 UA. Пристрій для вимірювання складових зусилля різання. № u2005506696; заявл. 08.07.2005; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

16. Жуковський, О. М., Крижанівський, Є. І., Рибчич, І. Й., Новіков, М. В., Бондаренко, М. О., Мечник, В. А. (2003). Пат. № 63469 UA. Алмазно-твердосплавна пластина. № u2003043732; заявл. 23.04.2003; опубл. 16.01.2006. Бюл. № 1.

Не є перевиданням