

Інструмент, порошки, пасти

УДК 622.24.05

**Є. А. Коровяка¹, А. О. Ігнатов¹, А. В. Павличенко¹,
Karel Valouch², В. О. Расцветаєв^{1,*}, О. В. Матяш³,
М. Р. Мекшун¹, С. О. Шипунов¹**

¹Національний технічний університет

“Дніпровська політехніка”, м. Дніпро, Україна

²IHS Markit, Energy Engineering Solutions, Brno, Czech Republic

³Національний університет “Полтавська політехніка

ім. Юрія Кондратюка”, м. Полтава, Україна

*rastsvietaiev.v.o@nmu.one

Дослідження особливостей роботи бурового породоруйнівного та технологічного інструмента

Представлено порівняльний виклад основних результатів дослідження механізму функціонування бурових доліт із модернізованою системою озброєння та технологічного інструмента на вибої свердловини. Сформульовано інженерну методику розрахунку мінімально необхідного значення осьового навантаження, яке забезпечує реалізацію високоефективного об'ємного характеру руйнування. Доведено існування стійкого зв'язку між можливою глибиною занурення одиничного породоруйнівного елемента озброєння та реалізованою частотою обертання у разі додержання певного значення осьового навантаження. Визначено раціональні параметри режиму буріння для доліт діаметром 112 і 132 мм. Запропоновано спосіб формування схеми розташування озброєння на шарошці долота, яка дозволяє отримати приріст механічної швидкості на 50–100 % в кожному конкретному випадку. Відповідно до отриманих значень рейсової швидкості буріння пропонуваними долотами, виявлено деяке виключення процесів повторного руйнування відокремлених від вибою часток породи під шарошкою, що дозволяє значно збільшити термін працездатності інструмента. Встановлено наявність поліпшення умов руйнування порід за дії гідростатичного тиску стовпа промивальної рідини у разі застосуванні доліт із модернізованим озброєнням. Показано можливість скорочення витрат потужності на обертання бурильної колони в середньому в 2–3 рази через застосування для хімічної обробки бурових розчинів спеціальних мастильних домішок. Одночасно з регулюванням мастильної здатності бурових розчинів, виявлено позитивний вплив активних домішок на показники в'язкості та статичного напруження зсуву, що дозволяє рекомендувати їх до застосування під час проходки порід, схильних до інтенсивного поглинання та шламотворення.

© Є. А. КОРОВЯКА, А. О. ІГНАТОВ, А. В. ПАВЛИЧЕНКО, KAREL VALOUCH, В. О. РАСЦВЕТАЄВ, О. В. МАТЯШ,
М. Р. МЕКШУН, С. О. ШИПУНОВ, 2023

Ключові слова: спорудження свердловин, буровий породоруйнівний та технологічний інструмент, бурильна колона, розвідувально-експлуатаційне буріння, надтверді матеріали.

ВСТУП

Процеси розробки родовищ корисних копалин неодмінно пов'язані з необхідністю проведення значного комплексу робіт, метою яких є отримання каналів зв'язку з покладом у масиві гірських порід, причому останні відрізняються значним різноманіттям фізико-механічних властивостей [1]. В якості вказаних каналів можуть виступати різні капітальні гірські виробки та їхня специфічна категорія – бурові свердловини, отримати які в товщі порід можна спрямованим руйнуванням породи на вибої [2]. На відміну від методів спорудження класичних гірських виробок, у разі буріння свердловин у безпосередньому контакті з ініціатором руйнівних процесів знаходиться достатньо незначний об'єм породи, який перебуває під впливом всебічного стиснення внаслідок комплексного прояву гірського, гідростатичного, гідродинамічного і пластового тисків [3]. Саме вказані обставини, а також різні за проявом властивості порід (що визначаються комплексом геологічних ознак), багато в чому і зумовлюють особливості вибійних процесів руйнування гірського масиву [4]. Та оскільки, здебільшого, застосовують чисто механічний метод руйнування за допомогою спеціального інструмента, на ефективність вибійних процесів безпосередній вплив має його конструктивне виконання та режимний регламент відпрацювання [5].

Значна гама варіантів оформлення робочої частини породоруйнівного інструмента обумовлена присутністю в гірських породах цілого ряду геологічних і структурно-механічних особливостей (мінералогічного складу, структури, текстури, розміру зерен, пористості, тріщинуватості) [6]. Зазначені ознаки та деякі інші саме і визначають механізм, а також загальну спрямованість руйнівних процесів, детальне вивчення яких можливе на підставі вивчення їхнього елементарного акту [7].

Беззаперечним є те, що процеси руйнування гірських порід, у тому числі у разі буріння свердловин, є у вищому ступені комплексними і підлеглими впливу багатьох чинників [8]. Оскільки вивчали саме механічний спосіб руйнування, основним параметром є осьове навантаження, створюване в цілому для породоруйнівного інструмента та його елементів озброєння зокрема [5]. І тому цілком логічним було з'ясування механізму впливу геометрії елементів озброєння на руйнівні процеси та їхні кінцеві результати. Такі дослідження є важливими не тільки з позицій суто теоретичної необхідності вивчення означеної проблематики, вони мають першорядну вагу як базові проміжні результати для розробки технології виготовлення та застосування конкретних типів породоруйнівного інструмента та матеріалів для озброєння його робочої частини [9]. Вказані характеристики мають бути максимально раціональними з огляду на необхідність створення та збереження для бурового інструмента значного ресурсу працездатності з одночасною реалізацією на вибої споруджуваної свердловини якнайефективнішого механізму руйнування за рекомендованим технологічним регламентом. Його складання, на жаль, не завжди повністю базується на адекватних геолого-технічних передумовах та гранично вірних науково-практичних положеннях [10].

Відповідно до конструктивних характеристик інструмента, необхідно визначити обґрунтовані межі його ефективного застосування в певних, здебільшого складних, геолого-технічних умовах (значні міцність та твердість гірських порід, прояв абразивного зношування елементів озброєння механіч-

ного породоруйнівного інструмента, тріщинуватість гірського масиву, яскраво виражене перемежування за механічними властивостями відносно геологічного розрізу свердловини), а також дослідити вплив на процеси руйнування гірських порід факторів механічних і гідравлічних явищ, як природного, так і штучного походження [11].

Отже, виходячи з вище сформульованих принципів положень, метою роботи було аналітично-лабораторне дослідження і обґрунтування базових принципів конструктивного вдосконалення бурових доліт, у тому числі системи їхнього озброєння, з одночасним вивченням механіки процесів руйнування гірського масиву цими долотами за відповідного технологічного супроводження, а саме дотримання певних показників режиму буріння та гідравлічної програми промивання свердловин, покликаних, у комплексі, забезпечити загальне підвищення продуктивності основних та допоміжних робіт за обертального буріння.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження руйнівних процесів і технічних засобів обертального буріння свердловин проводили на спеціальному стенді, оснащеному буровим верстатом СКТО-65 з плавно-регульованим приводом під час розбурювання породних блоків, створеного на базі навчального бурового полігону Національного технічного університету “Дніпровська політехніка” (НТУ “ДП”). Частоту обертання n , хв^{-1} шпинделя верстата встановлювали і контролювали за допомогою тахометра [12]. Осьове навантаження P_{oc} , даН на бурове долото регулювали за допомогою гідроциліндрів подавання бурового верстата. Абсолютну величину поглиблення вибою модельної свердловини l , мм визначали електронним штангенциркулем КМ-DSKW-300 (межа вимірювання/точність складала 0–300/0,01 мм), рухома ніжка якого була жорстко з’єднана з траверсою обертача бурового верстата і переміщувалася разом з нею, а нерухому з’єднували зі спеціальним кронштейном. Витрати промивальної рідини Q , л/хв визначали за допомогою витратоміру РГР-100 (межа вимірювання/точність складала 0,8–60 л·с⁻¹/1,5 %), встановленого на нагнітальній лінії гідравлічного контуру. Вимірювання технологічних властивостей бурових розчинів виконували згідно вимог РД-39-2-645–81 і стандартів АРІ 13В за допомогою лабораторії глинистих розчинів ЛГР-3. Потужність $N_{б.к.}$, що витрачається на холосте обертання бурильної колони під час варіювання технологічних показників бурового розчину та режимних параметрів процесу буріння, вимірювали за допомогою визначення рівня споживаного електричного току за допомогою ватметра TENSE [13].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Базовими принципами фундаментального удосконалення різносторонніх, за вирішуваними завданнями, процесів спорудження свердловин широкого спектру функціонального призначення, виступає раціоналізація складних вибійних процесів формування у гірському масиві означених специфічних виробок [14].

Хоча притаманність нині широко застосовуваним механічним методам буріння свердловин суттєвих недоліків (найголовнішим є низький коефіцієнт корисної дії руйнівних процесів) є доведеною, на сьогодні не існує альтернативних, достатньо науково і промислово обґрунтованих прийомів і методів, здатних скласти їм реальну конкуренцію [15]. Останнє твердження зовсім не

означає необхідність згортання пошуку принципово нових, наприклад, фізичних або комбінованих способів буріння [16].

Необхідно розвивати суто інноваційне спрямування досліджень, покликаних максимально повно врахувати і розкрити резерви удосконалення механічних способів руйнування гірського масиву (обертального, ударного, ударно-обертального, обертально-ударного) у всіх різноманітних аспектах, а саме модернізації породоруйнівного і технологічного інструмента з одночасною раціоналізацією режимного регламенту його роботи на вибої споруджуваної свердловини в складних літолого-технічних умовах (наявність в геологічному розрізі різних типів осадових порід – теригенних, глинистих, хемогенних, органогенних, з проявом значного кола їхніх властивостей фізико-хімічного характеру) за збереження можливості повного виконання геолого-технологічного завдання [17].

Розробка прогресивного породоруйнівного інструмента, який би задовольняв вимогам створення найефективнішого режиму руйнування гірського масиву, а саме об'ємного, в обов'язковому порядку повинна базуватися на дослідно-теоретичних даних щодо діючих на елементи озброєння інструмента навантажень, фізико-хімічних умов розвитку деформаційних явищ у породі вибою (збільшення рівня енергії, яка підводиться до вибою, зниження енергоємності процесу руйнування утворенням системи додаткових поверхонь оголення різної форми, які забезпечують принцип сколювання фрагменту породи з невеликими енерговитратами за рахунок деформацій зсуву або розтягу від прикладеного статичного або динамічного навантаження), реалізованої вибійної потужності та крутного моменту на бурильній колоні і буровому інструменті [18]. Вказані, гранично об'єктивні дані, дозволять отримати засадничі уявлення про принципи побудови технологічних схем швидкісних прогресивних методів руйнування гірського масиву за буріння свердловин [19].

На даний час до найбільш ефективних засобів руйнування гірського масиву відноситься інструмент, що оснащений природними або синтетичними надтвердими матеріалами [20] (до прикладу – це алмази різного походження [21] або інші матеріали – кубічний нітрид бору та полікристалічні надтверді матеріали [22, 23]). Проте, такий інструмент відрізняє значна вартість, що за умов обмеженості фінансування диктує об'єктивну необхідність застосування технічних засобів руйнування гірського масиву з твердосплавним озброєнням [24]. До вказаної групи засобів відносяться, насамперед, бурові шарошкові (дискові) долота (для суцільного буріння, що не допускає отримання зразків породи у вигляді кернів) та коронки (породоруйнівний інструмент для колонкового буріння свердловин із залишенням в її центральній частині моноліту гірського масиву у вигляді циліндричної колонки – керну) [5, 25].

Фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння НТУ “ДП” послідовно розвиваються окремі сторони процесів розробки, вдосконалення й режимно-технологічного супроводження бурового породоруйнівного інструмента [17]. Результатами цього є проектування нових типів шарошкових (із удосконаленим озброєнням) і дискових доліт – специфічного ланцюгового виконання, основними елементами яких є корпус і робоча частина, а також розробка раціональних режимів відпрацювання означеного інструмента та бурових шарошкових доліт (дроблячої та дробляче-сколюючої дії) і коронки із різним типом озброєння, у тому числі алмазним [26].

Пропонований до широкого впровадження в практику бурових робіт номенклатурний ряд дискових ланцюгових доліт за своїми особливостями має ряд суттєвих переваг, серед яких найбільш значущими є наступні. Конструк-

тивне виконання робочої частини бурового долота забезпечує реалізацію якнайефективнішого механізму руйнування, який обумовлюється перекриттям вибою свердловини в одній площині, суттєвим збільшенням контактної площі руйнівних елементів (ланцюгів і зубчастих дисків) із породою, а також взаємною нерівномірністю обертання останніх (супроводжується виникненням ефекту прослизання кожного окремого зубка відносно площини вибою). Крім того, бурові долота, що розглядали, мають порівняно більший ресурс роботи через можливість розташування в них численної кількості руйнівних елементів – зубків на ланцюзі значної, теоретично необмеженої, довжини [27].

Умовою сталої роботи дискового ланцюгового долота (за відповідного дотримання параметричних складових режиму буріння – частоти обертання n , витрати промивальної рідини та її компонентного складу Q , осьового навантаження P_{oc}) [28] є стійкість обертання виконавчого породоруйнівного вузла: ланцюгів і зубчастих дисків (армованих спеціальної конструкції зубками), а також зірочки, під впливом сил реакції вибою свердловини. Означена інтенсифікація руйнівних процесів пов'язана з виникненням значних знакозмінних напружень між окремими контактуючими породоруйнівними елементами, обумовлених, насамперед, наявністю моментів пар сил між двома рухливими ланцюгами [26].

Таке конструктивно-технологічне виконання, так само як і обґрунтована модернізація геометричних і кількісно-просторових характеристик породоруйнівних зубків (довжини різальної кромки, кута загострення, кількості, порядку розташування), дозволять максимально повно використовувати переваги пропонованих доліт. З огляду на сказане, було проведено аналітико-стендові та напівпромислові дослідження механізму роботи зубків долота з метою вивчення чинників протікання елементарного акту руйнування в парі твердосплавний зубок–гірська порода та умов раціоналізації визначення гранично допустимих і мінімально необхідних меж осьового навантаження P_{oc} на бурове долото [29].

Під час обертання дискового ланцюгового долота навколо вісі свердловини, нормальної до площини її вибою – умовно розташованого в координатній системі XOY , кожний породоруйнівний зубок ланцюгів та дисків, який має клиноподібну форму, буде здійснювати деякий рух у разі переходу з поточної точки контакту до наступної i -ї точки. Для можливості розгляду розподілу навантаження вздовж контуру поверхні різання позначаємо через φ_i кут між нормаллю в i -й точці контуру і віссю OY (вимірюваний в градусах); тоді F_i, N буде виступати i -ю складовою осьового навантаження в даній точці (F_n і R_n – складові осьового навантаження та реакції породного вибою в точці з φ_i , що дорівнює нулю):

$$F_i = -R_i \cos \varphi_i, \quad (5)$$

де R_i, N – величина реакції на дію сили в кожній точці деформованого вибою.

Під впливом компонента осьового навантаження зубок у точці з $\varphi_i = 0$ буде деформувати вибій свердловини, викликаючи відповідну реакцію вибою [30]. У відповідній інтерпретації закону Гука реакція вибою складатиме

$$R_n = -F_n = k \epsilon_0, \quad (6)$$

де k – коефіцієнт пропорційності; ϵ_0, N – деформація вибою свердловини у точці $\varphi_i = 0$.

Усі точки контуру в ріжучій поверхні перемістяться в осьовому напрямку на величину ϵ_0 , викликавши в кожній точці прилеглого контуру вибою деформацію

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \cos \varphi_i. \quad (7)$$

Тоді величина реакції в кожній точці деформованого вибою буде складати

$$R_i = -F_n \cos \varphi_i = k \varepsilon_0 \cos \varphi_i. \quad (8)$$

З виразу (8) маємо

$$\varepsilon_0 = -\frac{F_n}{k}, \quad (9)$$

тоді отримаємо наступне рівняння:

$$R_i = -F_n \cos \varphi_i, \quad (10)$$

а згідно з виразом (7)

$$F_i = F_n \cos^2 \varphi_i. \quad (11)$$

З курсу тригонометрії відомо [31], що

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \varphi + 1}, \quad (12)$$

звідки впливає наступний вираз:

$$F_i = \frac{F_n}{\operatorname{tg}^2 \varphi_i + 1}, \quad (13)$$

але $\operatorname{tg}^2 \varphi_i$ у нашому випадку визначає тангенс кута нахилу дотичної в даній точці до вісі OX і дорівнює значенню першої похідної в цій точці:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi_i = \left(\frac{dy}{dx} \right)_i = f'(x_i), \quad (14)$$

тоді

$$F_i = \frac{F_n}{[f'(x_i)]^2 + 1}, \quad (15)$$

а осьова складова навантаження буде визначена виразом

$$P_{oc} = \sum_{i=1}^n F_i = F_n \sum_{i=1}^n \frac{1}{[f'(x_i)]^2 + 1}. \quad (16)$$

Задаючись різними значеннями функції $f'(x_i)$, можна вибрати таку, за якої осьова складова навантаження буде мінімально необхідною для занурення окремого зубка в гірський масив на деяку величину h .

У табл. 1 представлено результати стендового буріння, в ході якого, непрямим методом, визначали глибину занурення окремого зубка h (іншими словами – товщину шару гірської породи, що знімається під час обертання долота) за варіювання параметричних складових режиму буріння, петрографічних (їх можна класифікувати як речовинний, насамперед мінеральний склад гірських порід; внутрішню будову гірської породи, тобто її текстуру і структуру; форму структурних складових гірської породи; умови залягання та фізико-хімічні умови утворення гірських порід) і механічних (відносно твердості за штампом $P_{шт.}$) властивостей досліджуваних порід у вигляді блоків.

Середню глибину занурення h кожного окремого зубка визначали діленням абсолютної величини поглиблення вибою модельної свердловини l на кількість зубків, що контактували з породним масивом. Оскільки пропонувані долота призначені, здебільшого, для роботи в породах середньої твердості (під цим терміном розуміємо властивість гірської породи чинити опір

зовнішньому механічному впливу іншого твердішого тіла, тобто деформуванню під час місцевої силової дії більш твердого тіла; твердість зумовлена, переважно, міцністю кристалічної ґратки конкретної породи, а саме: типом структури, природою та силою хімічного зв'язку, розміром і зарядом частинок, міжатомними відстанями та ін., а також її механічними параметрами – пружністю, пластичністю, крихкістю, наявністю і кількістю дислокацій тощо), то в якості досліджуваних порід було обрано достатньо поширену – вапняк, який є осадовою гірською породою, що складається з кальциту, збагаченого домішками глинистого матеріалу, кремнезему, оксидів заліза та ін., з твердістю за штампом $P_{шт.} = 1200\text{--}1500$ МПа. Зазначимо, що фізико-механічні властивості вапняку занадто неоднорідні, але прямо залежать від його структури і текстури. З метою виключення явища впливу на процеси руйнування анізотропних властивостей гірських порід (значну відмінність механічних властивостей у різних напрямках) також досліджували імітований гірський масив у вигляді цементного блоку, який за узагальненими фізичними показниками наближується до пружно-пластичного алевроліту (за руйнування витримує як пружні деформації – властивість порід під впливом зовнішнього навантаження змінювати свою форму і об'єм та відновлювати їх після усунення впливу, так і пластичні – властивість порід необоротно деформуватися під дією напружень, тобто зазнавати пластичну деформацію, однак без порушень суцільності) із умовною теоретичною твердістю за штампом $P_{шт.} = 50$ МПа [32].

Таблиця 1. Середня товщина шару гірської породи h , що знімається під час обертання долота

| Тип досліджуваного блоку | $n, \text{хв}^{-1}$ | $h, \text{мм}$ за $P_{ос.}, \text{Н}$ | | | |
|--------------------------|---------------------|--|-------|-------|-------|
| | | 3500 | 5000 | 6500 | 8000 |
| Вапняк | 50 | 0,078 | 0,118 | 0,132 | 0,274 |
| | 75 | 0,051 | 0,076 | 0,108 | 0,146 |
| | 100 | 0,046 | 0,064 | 0,072 | 0,082 |
| | 125 | 0,038 | 0,052 | 0,056 | 0,062 |
| Штучний цементний блок | 50 | 0,472 | 0,685 | 0,622 | 0,762 |
| | 75 | 0,364 | 0,416 | 0,535 | 0,613 |
| | 100 | 0,306 | 0,327 | 0,438 | 0,446 |
| | 125 | 0,198 | 0,323 | 0,347 | 0,374 |

За багаторазового силового впливу механічного інструмента в гірській породі розвивається система тріщин, через це твердість її поступово знижується і, отже, періодично на вибої споруджуваної свердловини виникають умови для об'ємного його руйнування.

Доцільно вести процес буріння за наявності об'ємного руйнування гірської породи на вибої свердловини і витягати частково вже зношений інструмент для заміни на початку стадії руйнування від утомленості.

Сумарна ефективність руйнування порід ідентичного петрографічного складу поволі знижується зі зростанням глибини свердловин. Вказане відбувається внаслідок значного ущільнення порід під дією гірського тиску. Також у свердловинах, що заповнені промивальними буровими рідинами, на породу

діє гідростатичний тиск, який негативно впливає на швидкість буріння, знижуючи її до мінімально можливих значень.

Аналіз даних табл. 1 дає можливість констатувати наступне. Зі зростанням твердості досліджуваних блоків швидкість поглиблення істотно зменшується. Також у разі збільшення частоти обертання n спостерігали значне зниження швидкості поглиблення вибою, що може бути пояснено недостатністю часу контактування зубка з породою та скороченням довжини шляху прослизання його в площині вибою. Вагомий вплив на поглиблення вибою чинить саме значення реалізованого осьового навантаження P_{oc} на долоті. Слід зауважити, що конструктивне виконання дискового ланцюгового долота не дозволяє створювати для нього надто значні навантаження P_{oc} через небезпеку виходу бурового інструмента з ладу. Та, крім зазначеного, у разі знижених частот обертання n спостерігали більший знос озброєння інструмента.

На основі аналізу результатів аналітично-лабораторних та стендових досліджень [33] було складено режимно-технологічний регламент відпрацювання проєктованих дискових доліт, класифікаційними ознаками якого є міцність порід на одновісне стискання $\sigma_{ст.}$ та діаметральні розміри долота, а рекомендованими параметрами режиму роботи є раціональні осьове навантаження P_{oc} і частота обертання n .

Наведені в табл. 2 дані є раціональними з позицій створення прийнятних умов механічного руйнування гірського масиву, а також виключення виникнення аномального зносу озброєння інструмента та унеможливлення виходу останнього зі стану працездатності в межах теоретичного терміну безвідмовної роботи [34]. Означені терміни можна узагальнено оцінити за дослідними даними табл. 3.

Таблиця 2. Раціональні параметри режиму буріння дисковими ланцюговими долотами за осьового навантаження P_{oc} і частоти обертання n

| Міцність порід на одновісне стискання $\sigma_{ст.}$, МПа | Параметри режиму буріння | | | |
|--|--------------------------|------|------------------------|-----|
| | P_{oc} , Н | | n , хв ⁻¹ | |
| | Діаметр долота, мм | | | |
| | 112 | 132 | 112 | 132 |
| 30 | 6100 | 6400 | 40 | 50 |
| 40 | 6500 | 7200 | 50 | 60 |
| 50 | 7000 | 7400 | 60 | 60 |
| 60 | 7600 | 7800 | 70 | 70 |
| 70 | 7800 | 7800 | 80 | 80 |
| 80 | 8000 | 8100 | 90 | 90 |
| 90 | 8200 | 8400 | 90 | 100 |

Вказані в табл. 3 показники є орієнтовними, проте їхній аналіз дає право цілком впевнено називати конструкцію бурових дискових ланцюгових доліт прогресивною, яка, серед іншого, дозволяє значно скоротити сумарний час на виконання спуско-підймальних операцій (СПО) в циклі спорудження свердловини, проведення яких диктується необхідністю заміни зношеного долота [35]. Наведена величина проходки на долото H є показовою, але не остаточною; збільшення її можливо через розміщення в конструкції долота ланцюгів більшої довжини. Зазначені дослідження дозволили, насамперед, довести

обґрунтованість вихідних положень напрямків удосконалення засад модернізації бурових доліт [36]. Доречним тут буде і те, що ланцюговий підхід був розповсюджений і на принципи створення комбінованих шарошково-ланцюгових доліт, призначених для руйнування порід із значними коливаннями механічних властивостей, а також розробку відхилювачів (пристрій направлено буріння) для спорудження або виправлення похилих свердловин [37].

Таблиця 3. Умовні нормативні дані про працездатність бурових дискових ланцюгових доліт за узагальненої проходки на долото H і середньої механічної швидкості буріння v_m

| Пройдена порода | H , м | v_m , м/год |
|-------------------------------------|---------|---------------|
| Сланці піщанисті та глинисті, пісок | ~ 1200 | 23,2 |
| Пісковик | ~ 900 | 12,5 |
| Сланець глинистий, пісок, крейда | ~ 1000 | 19 |
| Сланець піщанистий, пісок, крейда | ~ 1000 | 20 |

Серед основних недоліків стандартизованих шарошкових доліт [38], окрім відносно низької стійкості опорного вузлу та обмеженої кількості елементів озброєння, що вдалося в певній мірі усунути в конструкції дискових ланцюгових доліт, виділяється також недосконалість системи розташування породоруйнівних зубків на поверхні шарошки. Фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння НТУ “ДП” запропоновано можливий варіант удосконалення режиму роботи долота на вибої свердловини, що полягає у виключенні явища руху “за рейкою”, характерними ознаками якого є істотне зниження механічної швидкості буріння та інтенсивне зростання ступеню зношення озброєння внаслідок його роботи в так званій “шламовій подушці” [5, 17]. Означеним підходом виступає, у певній мірі, довільне розташування зубків. Перевірка цього положення була виконана на прикладі шарошок, озброєння на яких було розташовано за шаховим порядком.

Дослідне буріння зразків типових гірських порід (пісковика, алевроліту, мармуру) [39] долотом з модернізованим озброєнням здійснювали на спеціальному стенді та діючих свердловинах (табл. 4). Водночас додержувалися таких параметрів режиму буріння [40]: P_{oc} реалізовували в межах 6000–25000 Н, верхньою межею n було значення 200 хв⁻¹, Q не перевищувала 125 л/хв [41]; в якості промивальної рідини застосовували технічну воду та глинистий розчин, оброблений вуглелужним реагентом (ВЛР); густина промивальної рідини (глинистого розчину) складала до 1300 кг/м³, а умовна в’язкість, отримана за допомогою спеціального приладу СПВ-5, коливалась в інтервалі 20–25 с [42].

Аналіз даних табл. 4 дозволяє зробити наступні важливі висновки. У разі використання доліт із модернізованим озброєнням спостерігали суттєве збільшення механічної швидкості v_m буріння, що є непрямим доказом усунення невіправданого переподрібнення вже зруйнованої породи. Долота пропонованої конструкції, як наслідок, мають збільшений термін роботи на вибої свердловини та сприяють скороченню часового інтервалу спорудження свердловини і кількості трудомістких операцій з бурильною колоною [43].

Таблиця 4. Порівняльні результати дослідного буріння свердловин

| Тип озброєння Долота | Діаметр буріння, мм | Інтервал буріння, м | Час чистого буріння, год | Час буріння з урахуванням СПО, год | V_m , м/год | V_p , м/год | Зростання механічної швидкості буріння | Зростання рейсової швидкості буріння |
|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|--|--------------------------------------|
| Модернізоване/ Звичайне | 93/93 | 200/700 | 324/810 | 402/938 | 6,2/4,2 | 3,4/1,9 | ~ 1,5 | ~ 1,8 |
| | 76/76 | 200/600 | 136/188 | 153/201 | 2,7/1,8 | 2,4/1,7 | ~ 1,5 | ~ 1,4 |
| | 93/93 | 200/700 | 319/324 | 394,4/402 | 4,2/1,7 | 3,4/1,4 | ~ 2,5 | ~ 2,4 |
| | 93/93 | 200/600 | 84/121 | 114/154 | 4,7/2,8 | 3,5/2,2 | ~ 1,7 | ~ 1,6 |

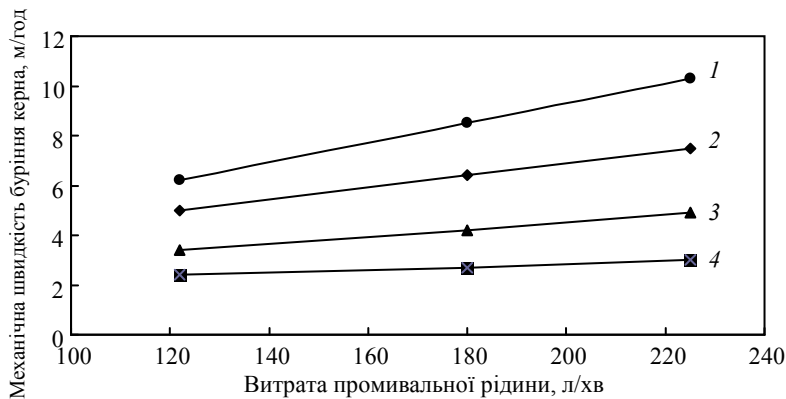
Наступним етапом досліджень стало вивчення умов роботи доліт, оснащених модернізованим типом озброєння, в залежності від стану властивостей напруженого гірського масиву [44], інтенсивність прояву яких зростає зі збільшенням глибини свердловини (табл. 5).

Таблиця 5. Результати буріння свердловин долотами з модернізованим типом озброєння

| Інтервал буріння, м | Пробурено, м | Час чистого буріння, год | Час на буріння з урахуванням СПО, год | V_m , м/год | V_p , м/год | Середня категорія порід | Параметри режиму буріння | | |
|---------------------|--------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------|
| | | | | | | | P_{oc} , Н | n , xv^{-1} | Q , л/хв |
| 0–200 | 595,5 | 20,9 | 43,9 | 28,5 | 13,6 | 4,2 | 7000–15000 | 218–291 | 125–180 |
| 200–300 | 301 | 41,0 | 56,6 | 7,4 | 5,3 | 5,7 | 15000–18000 | 218–291 | 125–180 |
| 300–400 | 299,5 | 49,2 | 69,2 | 6,1 | 4,3 | 5,7 | 16000–18000 | 218–356 | 125–180 |
| 400–500 | 298,3 | 81,5 | 108,0 | 3,7 | 2,8 | 5,8 | 16000–18000 | 174–291 | 125–180 |
| 500–600 | 300,2 | 110,7 | 134,0 | 2,7 | 2,3 | 5,8 | 18000–20000 | 174–291 | 125–180 |
| 600–700 | 182,8 | 42,8 | 69,2 | 4,3 | 2,7 | 5,8 | 18000–22000 | 174–356 | 125–180 |
| 700–800 | 30,1 | 19,5 | 20,5 | 1,54 | 1,47 | 5,9 | 18000 | 174–291 | 125–180 |
| Разом | 2007,4 | 365,6 | 501,4 | 5,5 | 4,0 | | | | |

Не важко бачити, що з наведених даних (див. табл. 5) впливає тенденція існування стійкого кореляційного зв'язку між значенням глибини свердловини та досягнутої для неї механічної швидкості буріння; вказане є результатом прояву дії гірського тиску, а також гідростатичного та гідродинамічного тисків стовпу промивальної рідини [45]. Проте, навіть із їхнього урахуванням, долота розглядуваної конструкції дають порівняно вищі показники проходки.

Для підтвердження положення про наявність впливу гідростатичного та гідродинамічного тисків промивальної рідини на швидкість поглиблення вибою [46], було проведено спеціальні дослідження (рисунок), змінними параметрами яких були глибина свердловини та витрата промивальної рідини Q [47].



Залежність механічної швидкості буріння v_m від кількості промивальної рідини Q , що подають на вибій свердловини в інтервалі 200–300 (1), 300–400 (2), 400–500 (3), 500–600 (4) м.

Аналізуючи дані рисунка, можна сформулювати такі принципові висновки. Підвищені витрати промивальної рідини доцільні лише у верхніх інтервалах свердловини, де гідростатичний тиск не є значним [48]. Із подальшим збільшенням глибини свердловини стає помітним вплив тиску стовпа промивальної рідини на вибійні процеси руйнування та транспортування продуктів дезінтеграції гірського масиву, який проявляється в ускладненні видалення з вибою зруйнованих часток породи, що може бути лише частково нівельовано довірливим розташуванням зубків шарошки.

Витрата промивальної рідини повинна забезпечувати повне очищення вибою від зруйнованої породи і винос її на поверхню [49]. Проведені раніше дослідження дозволили встановити, що під час буріння долотами утворюється ~ 55 % шламу крупністю до 8 мм. Орієнтовні розрахунки показали, що швидкість висхідного потоку промивальної рідини густиною 1100 кг/м^3 в свердловині діаметром до 100 мм у разі механічної швидкості буріння від 3 до 20 м/год має бути в межах від 0,47 до 1,18 м/с, а витрата промивальної рідини – 128–342 л/хв.

Важливим питанням забезпечення надійної роботи дискових ланцюгових доліт є підтримка для них належного режиму промивання з огляду на необхідність забезпечення реалізації функцій змащування контактних поверхонь [50], розвинених в самій конструкції долота та бурильній колоні. Опосередкованим методом з'ясування рівня мастильної здатності промивальної рідини є вимірювання рівня потужності $N_{б.к.}$ на бурильній колоні, що витрачається для обертання бурового і технологічного інструмента. Проведені авторами дослідження дозволили встановити, що ефективними змащувальними добавками можуть бути деякі органічні сполуки, механізм дії яких розглянуто на прикладі талового масла [51].

Рівень потужності $N_{б.к.}$ на бурильній колоні (табл. 6) визначали за допомогою електричного ватметра, підключеного до затискувачів електродвигуна бурового верстата.

Таблиця 6. Потужність, що витрачається на холосте обертання бурильної колони у разі варіювання технологічних показників промивальної рідини та режимних параметрів процесу буріння

| Довжина колони бурильних труб, м | $n, \text{хв}^{-1}$ | $N_{\text{б.к.}}, \text{кВт}$ | |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|--|
| | | Глинистий розчин | Глинистий розчин з добавкою талового масла |
| 200 | 127 | 1,0 | 0,9 |
| | 238 | 5,3 | 2,3 |
| | 346 | 14,3 | 5,0 |
| 400 | 127 | 2,4 | 1,2 |
| | 238 | 11,0 | 3,2 |
| | 346 | 29,7 | 6,5 |
| 600 | 127 | 3,0 | 1,5 |
| | 238 | 19,2 | 5,6 |
| | 346 | 45,0 | 13,2 |

Дані табл. 6 дозволяють стверджувати правомірність пропозиції використання талового масла в якості змащувальної добавки [52], яка підтверджується існуванням значного скорочення витрат $N_{\text{б.к.}}$, що є вагомою передумовою зниження рівня використання енергії на загальний цикл спорудження свердловин.

Задля можливості адекватного оцінювання фізико-хімічних наслідків [53] уведення до складу промивальної рідини талового масла, в табл. 10 представлено дані щодо результатів корегування технологічних показників бурових промивальних рідин активним компонентом [54].

Аналіз наведених у табл. 7 показників промивальної рідини приводить до такого комплексного висновку: істотний вплив талове масло [55], окрім достатньо високих змащувальних властивостей, має лише на умовну в'язкість та статичне напруження зсуву, що є додатковим фактором використання обробленого глинистого розчину у відповідних геолого-технічних умовах.

Таблиця 7. Вплив добавок талового масла на технологічні показники властивостей глинистих розчинів

| Активний компонент | Концентрація, % | Густина промивальної рідини, $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ | Умовна в'язкість, С | Водовіддача, $\text{см}^3/30 \text{хв}$ | Товщина глинистої кірки, мм | Статичне напруження зсуву, $\text{мг}\cdot\text{см}^{-2}$ | |
|--------------------------|-----------------|--|---------------------|---|-----------------------------|---|-------|
| | | | | | | 1 хв | 10 хв |
| Дистилюване талове масло | – | 1,05 | 26 | 16 | 1,5 | 64,2 | 67,3 |
| | 0,12 | 1,02 | 33 | 16 | 1,0 | 67,3 | 78,0 |
| | 0,25 | 1,02 | 36 | 15 | 1,0 | 76,5 | 89,2 |
| | 0,5 | 1,00 | 32 | 14 | 1,0 | 85,8 | 96,5 |
| | 1,0 | 1,00 | 33 | 14 | 1,0 | 85,8 | 96,5 |
| | 2,0 | 1,02 | 45 | 14 | 1,0 | 97,5 | 112,2 |
| | 4,0 | 1,02 | 48 | 14 | 1,0 | 99,5 | 114 |

ВИСНОВКИ

Репрезентовані в статті матеріали досліджень з аналітично-лабораторного вивчення засад конструктивного вдосконалення бурових доліт на підставі стендового моделювання їхньої роботи за варіювання показників технологічного режиму, дозволяють констатувати наступні теоретично-прикладні результати.

Запропоновано методичний принцип розрахунку питомого навантаження на зубок долота за ознакою мінімального навантаження для реалізації об'ємного виду руйнування гірської породи. Встановлено, що раціональним діапазоном частот обертання доліт ланцюгового виконання є $40\text{--}100 \text{ хв}^{-1}$ з варіюванням для них осевого навантаження в межах $6\text{--}8,5 \cdot 10^3 \text{ Н}$.

Доведено, що стосовно роботи ланцюгового долота показовим є прояв ефекту прослизання зубків відносно площини вибою, за якого порода руйнується внаслідок формування напружень розтягнення; поява останніх обумовлена особливостями конструктивного виконання саме ланцюгового органу долота.

Раціональним методом виключення режиму роботи шарошкового долота “за рейкою” є застосування довільного порядку розташування породоруйнівних зубків на поверхні шарошок, що підтверджено зростанням механічної та, відповідно, рейсової швидкостей буріння в середньому на 80 %.

Встановлено складну залежність механічної швидкості буріння від зростання глибини свердловини, значення якого в інтервалі до 800 м зменшується на порядок від контрольованих IV до VI категорій за твердістю, що може бути пояснено наявністю впливу гідростатичного тиску стовпа промивальної рідини.

Значним резервом скорочення витрат потужності на обертання бурильної колони може бути застосування змащувальних домішок, які в межах концентрацій 1–2 % дозволяють знизити рівень потужності в 2–3 рази, особливо за частоти обертання, що перевищує 300 хв^{-1} .

На прикладі реагенту “талове масло” показано можливості хімічного регулювання технологічних показників глинистого розчину. Інтервалом концентрацій талового масла, в якому не погіршуються контрольовані показники промивальних рідин, є 0,5–1,0 %.

Розроблені техніко-технологічні рішення можуть бути впроваджені на основних об'єктах ведення бурових робіт як в Україні, так і за кордоном.

Ye. A. Koroviaka¹, A. O. Ihnatov¹, A. V. Pavlychenko¹,
Karel Valouch², V. O. Rastsvietaiev¹, O. V. Matyash³,
M. R. Mekshun¹, S. O. Shypunov¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²IHS Markit, Energy Engineering Solutions, Brno, Czech Republic

³National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”,
Poltava, Ukraine

A study of the functional features of the rock-destroying
and technological tool

An engineering methodology of calculating the minimum necessary value of axial load, providing the highly efficient volumetric breaking, has been formulated. Stable connection between the possible penetration depth of a single rock-breaking element of a cutting structure and the implemented rotation frequency while adhering to a certain value of axial load has been proved. Rational parameters of drilling practice for bits of 112 and 132 mm in diameter have been determined. A method for forming a scheme of cutting structure arrangement on the

bit roller has been proposed; the method helps reach the mechanical velocity increase by 50–100 % at each specific case. It has been defined that rock breaking conditions are improved at the acting hydrostatic pressure of a flushing liquid column while using bits with the modernized cutting structure. It has been shown that it is possible to reduce power consumption for drill-string rotation (on average, by 2–3 times) by applying special lubricating additives for chemical processing of drilling muds. Along with the regulation of lubricating capacities of drill muds, positive effect of active admixtures on the indices of viscosity and static shearing stress has been identified.

Keywords: well site construction, drilling rock-cutting and technological tools, drillstring, exploratory and operational drilling, superhard materials.

1. Korovyaka Y., Astakhov V., Manykian E. Perspectives of mine methane extraction in conditions of Donets'k gas-coal basin. *Progr. Technol. Coal, Coalbed Methane, Ores Mining*. 2014. P. 311–316.
2. Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers, 2014. 1707 p.
3. Zhang Z.X. Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. Butterworth-Heinemann, 2016. 528 p.
4. Lopez J.C., Lopez J.E., Javier F. Drilling and Blasting of Rocks. CRC Press Taylor and Francis, 2017. 408 p.
5. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Min. Miner. Deposits*. 2021. Vol. 15, no. 3. P. 122–129.
6. Sawant P.T. Engineering and General Geology. Imprint NIPA, 2011. 484 p.
7. Ighnatov A. Research into parameters characterizing the process of withdrawing clay-mud formations from bore hole vuggy zones. *Min. Miner. Deposits*. 2016. Vol. 10, no. 1. P. 63–68.
8. ASME Shale Shaker Committee. Drilling Fluids Processing Handbook. Gulf Professional Publishing; 1st ed., 2004. 696 p.
9. Dareing Don W. Oilwell Drilling Engineering. ASME Press, 2019. 514 p.
10. Hossain M.E., Islam M.R. Drilling Engineering Problems and Solutions: A Field Guide for Engineers and Students. Wiley-Scrivener, 2018. 642 p.
11. Hossain M.E., Islam M.R. Drilling Engineering: Towards Achieving Total Sustainability (Sustainable Oil and Gas Development Series). Gulf Professional Publishing; 1st ed., 2020. 800 p.
12. Fanchi J.R. Principles of Applied Reservoir Simulation. Gulf Professional Publishing; 4th edition, 2018. 364 p.
13. Benyoucef Lyes. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation (Springer Series in Advanced Manufacturing). Springer; 1st edition, 2020. 268 p.
14. Ihnatov A., Koroviaka Y., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *E3S Web Conf*. 2021. Vol. 230, art. 01016.
15. Jeffery W.H. Deep Well Drilling: The Principles and Practices of Deep Well Drilling, and a Hand Book of Useful Information for the Well Driller. Palala Press, 2018. 538 p.
16. Austin E.H. Drilling Engineering Handbook. Springer Science & Business Media, 2012. 300 p.
17. Koroviaka Ye.A., Ihnatov A.O. Advanced well Construction Technologies. Dnipro: Dnipro University of Technology, 2020. 164 p.
18. Guan Z., Chen T., Liao H. Theory and Technology of Drilling Engineering. Springer; 1st ed., 2020. 789 p.
19. Ihnatov A.O., Koroviaka Y.A., Pinka J., Rastsvietaiev V.O., Dmytruk O.O. Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1. P. 11–18.
20. Lisovsky A.F., Bondarenko N.A., Davidenko S.A. Structure and properties of the diamond–WC–6Co composite doped by 1.5 wt% of CrSi₂. *J. Superhard Mater.* 2016. Vol. 38, no. 6. P. 382–392.
21. Mitchell R.F., Miska S.Z. Fundamentals of Drilling Engineering (Spe Textbook Series). Society of Petroleum Engineers, 2010. 696 p.
22. Bondarenko N.A., Mechnik V.A. The influence of transition area diamond-matrix on wear resistance and operation properties of drilling tool produced by ISM. *SOCAR Proc.* 2011. No. 2. P. 18–24. art. 00062.
23. Bondarenko N.A., Mechnik V.A. (2012). Drilling oil and gas wells by ISM diamond tools. *SOCAR Proc.* 2012. No. 3. P. 6–12. art.00116.
24. Gabolde G., Nguyen J.P. Drilling Data Handbook. Editions Technip; 8th edition, 2006. 600 p.

25. Fanchi J.R., Christiansen R.L. Introduction to Petroleum Engineering. Wiley; 1st ed., 2016. 352 p.
26. Ighnatov A. Technological characteristics of the device for bore hole cleaning. *Min. Miner. Deposits*. 2016. Vol. 10, no. 2. P. 85–90.
27. Ihnatov A.O., Andrusenko S.Yu. Drill bit. *Pat. 95202 UA:IC E21B 11/00*. Publ. 11.07.2011.
28. Skalle P. Drilling Fluid Engineering. Pal Skalle & bookboon.com, 2015. 160 p.
29. Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Haddad J., Tershak B.A., Kaliuzhna T.M., Yavorska V.V. (2022). Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. No. 1. P. 20–27.
30. Bansal R.K. Strength of materials. Laxmi Publication LTD, 2015. 596 p.
31. OpenStax. Algebra and Trigonometry by OpenStax. XanEdu Publishing Inc; First edition, 2015. 1216 p.
32. Vaddadi N. Introduction to Oil Well Drilling. Bathos (U Vee Infosystems); 1st ed., 2015. 204 p.
33. Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing Systems Modeling and Analysis. Springer; 2nd ed., 2011. 354 p.
34. Hossain M.E., Al-Majed A.A. Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering. Wiley-Scrivener; 1st ed., 2015. 786 p.
35. Voytenko V., Vitryk V. Drilling technology and technique. Kyiv: Center of Europe, 2012. 708 p.
36. Speight, J.G. Rules of Thumb for Petroleum Engineers. Wiley-Scrivener; 1st ed., 2017. 762 p.
37. Aadnoy B.S., Looyeh R. Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design. Gulf Professional Publishing; 1st ed., 2011. 376 p.
38. Baker R. A Primer of Oilwell Drilling: A Basic Text of Oil and Gas Drilling. Univ of Texas at Austin Petroleum; Pap/Chrt ed., 2000. 192 p.
39. Kumar S.K.H. Introduction to Mineralogy and Petrology. Elsevier, 2013. 354 p.
40. Pavlychenko A.V., Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Ratov B.T., Zakenov S.T. Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction. *ICSF-2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. E3S Web Conf*. 2022. Vol. 1049. art. 012031.
41. Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Gulf Professional Publishing; 6th ed., 2011. 720 p.
42. Milap G. Mud Engineering Simplified. Becomeshakespeare.com, 2017. 412 p.
43. Jadhav S. Oil and Gas Production. Scitus Academics Llc; UK ed., 2015. 230 p.
44. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. Cambridge University Press; 3rd ed., 2020. 756 p.
45. Haghi A.K., Gonzalez C.N.A., Thomas S., Praveen K.M. Physical Chemistry for Engineering and Applied Sciences (Innovations in Physical Chemistry). Apple Academic; 1st ed., 2021. 452 p.
46. Hossain, M.E. Fundamentals of Drilling Engineering: MCQs and Workout Examples for Beginners and Engineers. Wiley-Scrivener; 1st ed., 2016. 854 p.
47. Gelfgat Ya.A., Gelfgat M.Y., Lopatin Yu.S. Advanced Drilling Solutions: Lessons From The FSU. PennWell Corporation, 2003. 492 p.
48. Fink J. Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids. Gulf Professional Publishing; 2nd ed., 2015. 854 p.
49. Guo B., Liu X., Tan X. Petroleum Production Engineering. Gulf Professional Publishing; 2nd ed., 2017. 780 p.
50. Koroviaka Ye.A., Mekshun M.R., Ihnatov A.O., Ratov B.T., Tkachenko Ya.S., Stavychnyi Ye.M. Determining Technological Properties of Drilling Muds. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No. 2. P. 25–32.
51. Dalal M. A Textbook of Physical Chemistry. Vol. 1. Dalal Institute, 2018. 432 p.
52. Atkins P., Julio de Paula. Physical Chemistry. W.H. Freeman; 8th ed., 2006. 1072 p.
53. Sharma K.K., Sharma L.K. A Textbook of Physical Chemistry, 6th Edition. Vikas Publishing, 2016. 864 p.
54. Hassan J., Mahdi S. The physical chemistry of materials. Published by Shahid Rajae Teacher Training University, 2018. 295 p.
55. Fink J. Oil Field Chemicals. Gulf Professional Publishing, 2003. 495 p.

Надійшла до редакції 22.02.23

Після доопрацювання 23.03.23

Прийнята до опублікування 23.03.23