

12. Hossain, M.E., & Al-Majed, A.A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley & Sons.

УДК 622.277

DOI: 10.33839/2708-731X-25-1-106-118

А.О. Ігнатів, канд. техн. наук; **О.М. Давиденко**, д-р техн. наук; **В.Л. Хоменко**,
О.А. Пашенко, кандидати технічних наук, **В.В. Яворська**, **С.О. Шипунов**, **Я.С. Ткаченко**

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: koroviaka.ye.a@ntu.one*

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ НЕМЕХАНІЧНИХ СПОСОБІВ БУРІННЯ

Представлено результати експериментальних досліджень особливостей проведення бурових робіт, що пов'язані із застосуванням гідромоніторних струменів для інтенсифікації руйнівних процесів на вибої свердловин, виконано із залученням сучасних методів аналітичного аналізу і відповідних лабораторно-стендових досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень, контрольованих вимірювальних приладів і матеріалів. Протікання гідравлічних свердловинних бурових процесів моделювалось на експериментальних свердловинах із застосуванням бурових установок та відповідного інструменту і обладнання.

Викладено деякі формальні ознаки нині широко застосовуваних механічних обертових способів поглиблення вибоїв свердловин із визначенням особливостей їх техніко-технологічного супроводження в різних геолого-технічних умовах. Розроблено окремі структурні елементи технології виконання свердловинних руйнівних процесів із застосуванням явищ гідромоніторної дезінтеграції гірського масиву. Представлено засадничі принципи конструктивної побудови лабораторної бази дослідження гідравлічно-активованих струменів бурової промивальної рідини та відповідного вибійного інструменту – гідравлічного буру. Аналітично і практично доведено, що ефективність роботи розглянутих механізмів в значній мірі визначається адекватністю отриманих попередніх розрахункових параметрів гідроруйнування, що є похідною фізико-механічних та хімічних властивостей гірських порід (бурових промивальних рідин), і характеристик використовуваного обладнання, технологічного інструменту тощо.

Створено та обґрунтовано окремі складові удосконаленої технологічної методики та відповідного технічного супроводження виконання свердловинних робіт при застосуванні ефекту гідравлічного руйнування гірського масиву, що базуються на сучасних прогресивних промислових принципах і високих економічних показниках; також представлено загальні та базові конструктивні характеристики обладнання та інструменту для здійснення робіт, пов'язаних із адаптацією гідромоніторних явищ до конкретних свердловинних умов. Отримані дані є основою для подальших розробок в напрямку підвищення якості і надійності виконання бурових і супутніх робіт при проведенні свердловин із застосуванням базових принципів гідравлічного руйнування гірського масиву.

Ключові слова: буріння свердловин, гідромонітор, насадок, руйнування гірського масиву, дослідницький експериментальний стенд, гідравлічний бур, активований струмінь рідини, багатофазні потоки.

Вступ

Загальні та спеціальні вимоги до вибору ефективного способу буріння визначаються, насамперед, необхідністю забезпечення успішної проводки стовбура свердловини за можливого прояву різноманітних ускладнень та із збереженням високих техніко-економічних показників [1]. При поглибленні вибою свердловини його породний масив може руйнуватися дованням, свердлінням або (та) стиранням. Причому кожному з перелічених видів

руйнування відповідають основні методи буріння: ударний, обертальний, ударно-обертальний. Та незважаючи на відмічене, найбільше застосування отримало саме обертальне буріння в своїх різноманітних модифікаціях (роторне буріння – при ньому двигун, який приводить в обертання породоруйнівний інструмент на вибої за допомогою колони бурильних труб, знаходиться на поверхні – гирлі свердловини; буріння з використанням вибійного, іншими словами занурюваного двигуна, у вигляді турбобуру, гвинтобуру або електробуру, передбачає їх розміщення безпосередньо біля вибою свердловини – над долотом) [2]. За вказаного способу, звісно, циліндричний стовбур свердловини формується спеціальним інструментом (долотом або буровою коронкою), що безперервно обертається. Зруйновані частки гірської породи в процесі буріння також неспинно виносяться на поверхню циркулюючим буровим розчином (іншим різновидом більш загального тлумачення – очисним агентом) [3]. При обертальному бурінні вибійний руйнівний інструмент занурюється в гірську породу в результаті одночасної дії осевого зусилля (навантаження), спрямованого перпендикулярно до площини взаємодії, і окружного зусилля від обертового моменту.

Зазначимо, що роторне і турбінне буріння є основними способами проводки свердловин, їх застосовують повсюдно [4].

Буровий ротор призначений для виконання наступних функцій: обертання (вертикально переміщеної) бурильної колони в процесі проходки свердловини роторним способом; сприйняття реактивного крутного моменту і забезпечення подовжньої подачі бурильної колони при використанні вибійних двигунів; утримання бурильної або обсадної колони труб над гирлом свердловини при нарощуванні і спуско-підймальних операціях тощо.

Вибійний двигун – турбобур, що розташовується безпосередньо над долотом, – є машиною, яка перетворює гідравлічну енергію потоку бурового розчину в механічну енергію, необхідну для обертання долота.

Формування стовбуру свердловини при глибокому нафтогазовому бурінні в гірському породному масиві відбувається за рахунок використання, насамперед, доліт різних типів і моделей, розширювачів і бурильних голівок (колонкових доліт), до яких висуваються наступні основні вимоги: 1) висока руйнівна здатність; 2) висока зносостійкість; 3) низька енергоємність руйнування гірських порід. Робота механічних породоруйнівних інструментів на вибої забезпечується їх функціональними системами: 1) озброєнням у вигляді різців або інденторів; 2) системою очищення (промивання) вибою і озброєння; 3) корпусом і приєднувальними різьбами; 4) у разі шарошкового інструменту – опорами шарошок і системою змащування їх підшипників [5].

Найбільш розповсюджене механічне руйнування гірських порід (поглиблення свердловини) при бурінні долотом (або іншим породоруйнівним інструментом) має складний характер – це доведено широкомасштабними дослідженнями багатьох науковців [6]. Слід зазначити і таке важливе положення: за кількісними показниками процесу поглиблення не можна судити про вплив того або іншого параметра на ефект руйнування гірських порід, їх дія завжди комплексна [7]. Експериментально доведено, що найбільш ефективно поглиблення свердловини може спостерігатися тільки в тому випадку, якщо вибій повністю очищається від шламу; в протилежному випадку вибурена порода чинить додатковий опір роботі руйнівному інструментові, внаслідок чого механічна швидкість проходки і проходка на долото (бурову коронку) нижчі за розрахункові значення [8]. Стендове буріння та виробнича практика показують, що техніко-економічні показники проходки свердловин значною мірою залежать від режиму промивання і технологічних властивостей (якості) циркулюючого бурового розчину [9]. Саме наведені факти та інші технологічні чинники стали передумовою появи низки інших, підкреслимо, немеханічних способів руйнування гірського масиву. Спрямованістю новітніх досліджень бурової справи, окрім іншого, є істотне покращення вибійних руйнівних процесів та скорочення витрат часу на допоміжні операції циклу спорудження свердловин. Досягнути вказаного можна шляхом, насамперед, створення

ефективного стійкого породоруйнівного інструменту (без уточнення конкретних механічних форм), який буде за мінімальної витрати вибівної потужності створювати найприйнятніші умови дезінтеграції гірського масиву. Вказаним вимогам, в деяких аспектах, відповідає відносно новітній напрямок у конструюванні озброєння породоруйнівного інструменту – це застосування доліт алмазно-твердосплавних композиційних вставок (для їх позначення використовується аббревіатура PDC, що є заголовними буквами англійської назви матеріалу – «полікристалічна алмазна композиція») [10]. Пластинами PDC (підкреслимо, що за технічними показниками вони відносяться до порівняно крихких матеріалів) переважно армуються долота, проте є досвід їх застосування в якості озброєння для бурових коронок. Буровий інструмент, оснащений пластинами PDC, за характером руйнування гірської породи можна віднести до різально-сколюючого. Зазначений інструмент відрізняється високою вартістю, а відмови у роботі ним пов'язані із руйнуванням алмазотвердосплавних зубків, що потребує досконалого вивчення умов його використання, причому за певних обставин (геолого-технічного характеру) застосування інструменту з PDC озброєнням є вельми нераціональним. Базовим вихідним положенням проектування техніко-технологічних основ раціональних методів поглиблення вибою є врахування фізико-механічних характеристик породного масиву та його головного параметру – міцності та твердості [11]. Породи відносно нетвердого комплексу найбільш раціонально руйнувати за допомогою гідромоніторних струменів рідини (безпосередньо або в комбінації із механічним інструментом). Вплив активних струменів рідини на породний масив проявляється в їх здатності значно інтенсифікувати процес руйнування (досягти вказаного ефекту можна і за рахунок впливу вібрації, хімічного розкладення цементуючої речовини тощо) [12].

На відміну від класичних механічних способів формування стовбуру свердловини в гірському масиві, робочим органом при гідравлічному руйнуванні виступає гідромоніторний струмінь, який здійснює водночас дезінтеграцію і підйом гірської маси (шламу) [13]. Гідравлічне (або комбіноване) руйнування ведеться затопленим вільним струменем рідини, як правило, за умов, коли густина матеріалу струменя дорівнює густині середовища. Потік робочої рідини, що виходить з гідравлічного насадку особливої конструкції бурового інструменту, повинен забезпечувати надійне і безперервне руйнування [14]. Як правило, динамічний вплив рідини на вибій свердловини прийнято оцінювати тиском або силою удару в місці контакту, а механізм руйнування твердих порід за таких умов інтерпретується як попереднє прорізання щілини із подальшим тріщиноутворенням, що сприяє виникненню різного роду напруг (зминання, стиск або розтяг) із подальшим відривом частинок від масиву, причому відомо наступне: на інтенсивність руйнування впливає тип і кількість тріщин. Проте доведено таке: при гідравлічному розмиві відносно м'яких порід принципи їх руйнування виявляються дещо інші, а саме – в означеному комплексі порід розвиток дезінтеграційних процесів практично завжди відбувається при значно менших значеннях тиску струменя на вибій відносно усереднених показників межі міцності порід, в яких іде формування стовбуру свердловини [15]. Означена специфічність розглядуваного явища полягає в тому, що процеси руйнування викликаються не стільки стисканням породи, скільки форсованим порушенням цілісності гірського масиву шляхом деякого його роз'єднання на окремі частинки та агрегати [6].

Відповідно до того, що основним робочим органом способів спорудження свердловин із повним або частковим застосуванням вибівного гідроруйнування є гідромоніторний струмінь, методика ефективного проектування такої технології повинна базуватися на визначенні характеристик гідромоніторних струменів (низького, середнього або високого тиску), основними формуючими параметрами яких є: гідравлічні параметри потоку в підвідному трубопроводі, швидкість вильоту струменя; витрати робочої рідини; діаметр та оформлення гідромоніторної насадки [4].

Мета статті – аналіз і розрахунок окремих позицій комплексного технологічного регламенту реалізації бурових робіт (заснованого на сталості техніко-економічних показників проведення свердловин і безпечності виконання основних бурових та допоміжних операцій), що пов'язані із застосуванням гідромоніторних струменів для інтенсифікації руйнівних процесів на вибої свердловин, які споруджуються в породах м'якого та середнього комплексу за міцністю.

Методики досліджень

Експериментальні дослідження особливостей проведення бурових робіт, які пов'язані із застосуванням гідромоніторних струменів для інтенсифікації руйнівних процесів на вибої свердловин, виконано із залученням сучасних методів аналітичного аналізу і відповідних лабораторно-стендових досліджень, зокрема шляхом використання загальних принципів математичного та фізичного моделювання, методик обробки результатів досліджень у середовищі EXCEL, MATHCAD, контрольно-вимірювальних приладів і матеріалів [16].

Протікання гідравлічних свердловинних бурових процесів моделювалось на експериментальних свердловинах навчального бурового полігону Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» із застосуванням бурових установок ЗІФ-650М, УКБ-4П та відповідного інструменту і обладнання [17].

Результати та їх обговорення

Адекватний і методичний гідравлічний розрахунок процесу циркуляції за гідравлічного руйнування виконують з метою визначення необхідних характеристик поверхневого бурового насоса (їх необхідної кількості), а також обґрунтованого вибору його типу, найбільш відповідного розрахунковим величинам [15]. При проведенні гідравлічного розрахунку визначають наступні важливі технологічні параметри: необхідну інтенсивність подачі очисного агенту; режим течії агенту залежно від швидкості руху; гідравлічні опори руху рідини за характерними ділянками, сумарні гідравлічні опори.

Ефективний технологічний процес промивання має бути спроектований і реалізований у такий спосіб, щоб досягти найкращих техніко-економічних показників буріння, і в цілому спорудження свердловини [3]. При цьому головну увагу необхідно приділяти виконанню основних функцій і задач реалізації досконалої гідравлічної програми очищення свердловини із виконанням вимог щодо її технологічних обмежень (наприклад, урахування гранулометричного складу продуктів руйнування гірських порід).

Усереднений розмір часток шламу, при будь-яких способах буріння, характеризується великим діапазоном: від декількох мікрон до сантиметрів. Саме тому для оцінки можливості транспортування гідравлічно-зруйнованого шламу потоком очисного агенту приймається зазвичай деякий середній розмір часток, які разом з дрібнішими фракціями складають основну частину продуктів руйнування, що утворюється при роботі вибійного бурового інструменту [9]. При цьому окремі частки на вибої споруджуваної свердловини можуть бути більше середнього розміру в 3–5 разів.

Істотний вплив на величину підйомної сили циркулюючого свердловиною потоку для часток шламу чинить також і їх форма, яка, залежно від структури перебудованих порід, має широку різноманітність втілення, причому найчастіше зустрічаються частки зернистої форми, включаючи округлі і неправильні із гострими ребрами та значною кількістю граней.

За умови наявності швидкості потоку, що дорівнює її критичному значенню $V_{кр}$, частки шламу середнього розміру лише утримуватимуться в зваженому стані, а винесення їх на поверхню відбуватися не буде. Стійке транспортування шламу буде спостерігатися тоді, коли швидкість потоку V_n перевищуватиме деяку критичну, причому частки рухатимуться зі швидкістю C , яка дорівнює різниці означених швидкостей потоку, тобто [5]:

$$C = V_n - V_{кр}. \quad (1)$$

Параметр C повинен забезпечувати реалізацію умов запобігання скупчуванню шламу на вибої та у стовбурі свердловин; також її слід збільшувати паралельно зростанню швидкості буріння і глибини свердловини.

Виведено наступний кількісний критерій X достатності очищення свердловини від зруйнованої породи, який є похідною об'ємної концентрації часток шламу в висхідному потоці промивальної рідини

$$X = V_{\text{БШ}}/V_{\text{КП}}, \quad (2)$$

де $V_{\text{БШ}}$ – об'єм бурового шламу в кільцевому просторі свердловини (залежно від реологічних властивостей бурової промивальної рідини коливається в межах 3 - 5%); $V_{\text{КП}}$ – об'єм кільцевого простору свердловини.

Широко застосовуваним у практиці буріння є критерій, визначуваний співвідношенням густин промивальної рідини:

$$C = \frac{F_{\text{В}}V_{\text{М}}(\rho - \rho_{\text{Р}})}{F_{\text{КП}}(\rho_{\text{РВ}} - \rho_{\text{Р}})}, \quad (3)$$

де $F_{\text{В}}$ – площа вибою споруджуваної свердловини; $V_{\text{М}}$ – механічна швидкість буріння; ρ – щільність часток зруйнованої гірської породи; $\rho_{\text{Р}}$ – густина бурової промивальної рідини; $F_{\text{КП}}$ – площа кільцевого простору свердловини; $\rho_{\text{РВ}}$ – густина висхідного потоку рідини, збагаченого продуктами руйнування.

Використовуючи рівняння (2), можна отримати такий вираз для визначення величини мінімальної швидкості транспортування часток шламу в кільцевому просторі за прямої схеми промивки:

$$C = \frac{F_{\text{В}}V_{\text{М}}}{F_{\text{КП}}X}, \quad (4)$$

Подальшим розвитком вивчення умов та наслідків застосування ефекту гідравлічного руйнування масиву з метою спорудження свердловин стала розробка фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння НТУ «ДП» спеціального дослідницького стенда (рис. 1) [18], який дозволяє, окрім іншого, вести спостереження та аналізувати локальні кількісні параметри багатозафазного потоку рідини (бурової промивальної) в умовах, максимально наближених до реальних.

В залежності від програми та задач досліджень, експериментальний стенд може включатися за різної послідовності підготовчих операцій та використовуваного ланцюжка

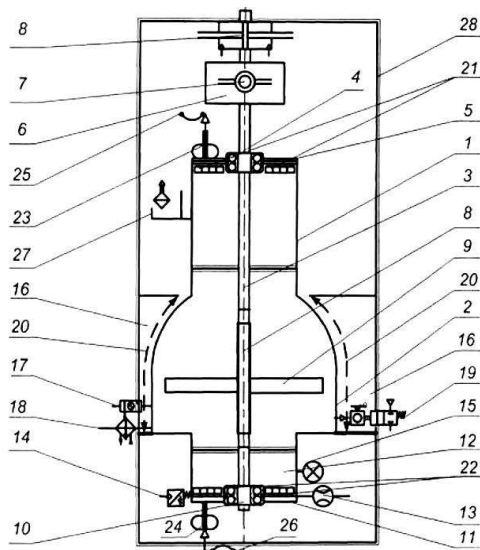


Рис. 1. Схема стенду для дослідження гідродинамічних потоків

контрольно-вимірювальної техніки, а в цілому він складається з секційної обсадної труби 1 (виконаної з оптично-прозорого пластикового матеріалу) із змінним патрубком 2, в ній співвісно розміщено приводний вал 3, верхній кінець якого через підшипниковий вузол позиціонування 4 з ущільненням верхньої знімної кришки-заглушки 5 з'єднано з блоком обертача 6, який обладнано тахометром 7 та механізмом подавання 8. Механізм 9, принцип роботи якого вивчається, жорстко з'єднаний з приводним валом 3, а його нижній кінець через підшипниковий вузол позиціонування 10 з ущільненням пропущено через нижню знімну кришку-заглушку 11. Вхідний контрольно-вимірювальний блок 12, розташований в нижній частині обсадної труби 1, складається з витратоміра 13, анемометра 14, манометра 15, а

параметричний 16 у складі термоанемометра 17 і турбінного витратоміра 18 з одного боку, та відеофіксатора 19 з іншого, має можливість 2-х або 3-и мірного переміщення відносно знімного патрубку 2 за допомогою координатників 20. Верхня 5 та нижня 11 знімні кришки-заглушки обладнані відповідно вирівнювачами 21 і 22 та приєднувальними муфтами 23 і 24 для з'єднання з магістральними трубопроводами зливу 25 та подавання 26. До складу верхньої секції обсадної труби включено також дозувальний пристрій матеріалу 27. Всі вузли стенда змонтовані в єдину систему за допомогою рами 28.

Гідравлічна система пропонованого стенда виконана таким чином, що дозволяє багаторазово використовувати циркуляційний агент по замкнутому циклу. Якщо необхідним фактором роботи досліджуваного механізму є його обертання навкруги осі свердловини, він включається до складу приводного вала 3, який з'єднано з блоком обертача 6. Надійність фіксації приводного вала 3 всередині обсадної труби 1 та унеможливлення заклинювання забезпечується підшипниковими вузлами позиціонування 4 і 10. Осьове переміщення приводного вала 3 з досліджуванним зразком 9 відбувається за рахунок механізму подавання 8, а вимір частоти його обертання – тахометра 7. Оперативний контроль за швидкістю активних струменів рідини, що формуються виконавчим органом досліджуваного механізму 9, відбувається за допомогою турбінного витратоміра 18. Динамічний тиск, створюваний струменями рідини в стовбурі імітованої свердловини, вимірюється манометром 15. Через відсутність можливості візуального спостереження за процесами циркуляції активованих струменів рідини та їх впливу на глинистошламові пасти в змінному патрубку 2, що обумовлена низькою видимістю, застосування відеофіксатора 19 допускається після освітлення рідини. Для створення умов безпосереднього контролю роботи досліджуваного механізму як середовище застосовується повітря, а результати досліджень оброблюються з урахуванням критеріїв подібності. За вказаних обставин швидкість осьових струменів, створюваних досліджуванним механізмом 9, вимірюється за допомогою термоанемометра 17, траєкторії руху активних багатофазних потоків реєструються відеофіксатором 19. Аеродинамічна дія, створювана активованими струменями в стовбурі свердловини, вимірюється манометром 15 і анемометром 14. За рахунок використання координатників 20, які забезпечують високоточне переміщення контрольних приладів, є можливість установки в будь-якій проміжній його площині, що простирається від нижньої горизонтальної до верхньої горизонтальної в лівій або правій вертикальних площинах, розташованих паралельно вісі обсадної труби 1 приладів для контролю параметрів потоку.

Пропонована конструктивна схема експериментального стенду дозволяє здійснювати вимір 2-х або 3-х мірних полів швидкості робочого потоку в корисному об'ємі рідини (бурової промивальної), а його працездатність та адекватність отриманих даних дійсності перевірялися в ході виконання численних досліджень (за умов зіставлення отриманих даних із промисловими).

Стенд може бути використаний для моделювання умов очищення вибою та стовбура свердловини в умовах максимально наближених до реальних, що дозволяє отримати цілком достовірні локальні кількісні гідродинамічні характеристики багатофазних потоків циркулюючих агентів, викликаних роботою виконавчих органів бурового гідравлічного інструменту, а також вивчення процесів шламоскупчення, з широким варіюванням технологічних параметрів циклу очищення, в ускладнених ділянках.

Проведення натурних досліджень циркуляційних процесів при роботі спеціальних гідромоніторних пристроїв відбувалося на спеціальній стендовій буровій (рис. 2), яка включала: буровий плунжерний насос НБ 3-120/40 за позицією 1, витратомір ЕМР-2, позначений під номером 2, модель свердловини 3, буровий сальник 4, бурильні труби 5, всмоктуючий та нагнітальний трубопроводи 6 та 7, буровий верстат 8, резервуар для відбору проб очисного агента 9, жолобну систему 10, відстійник 11.

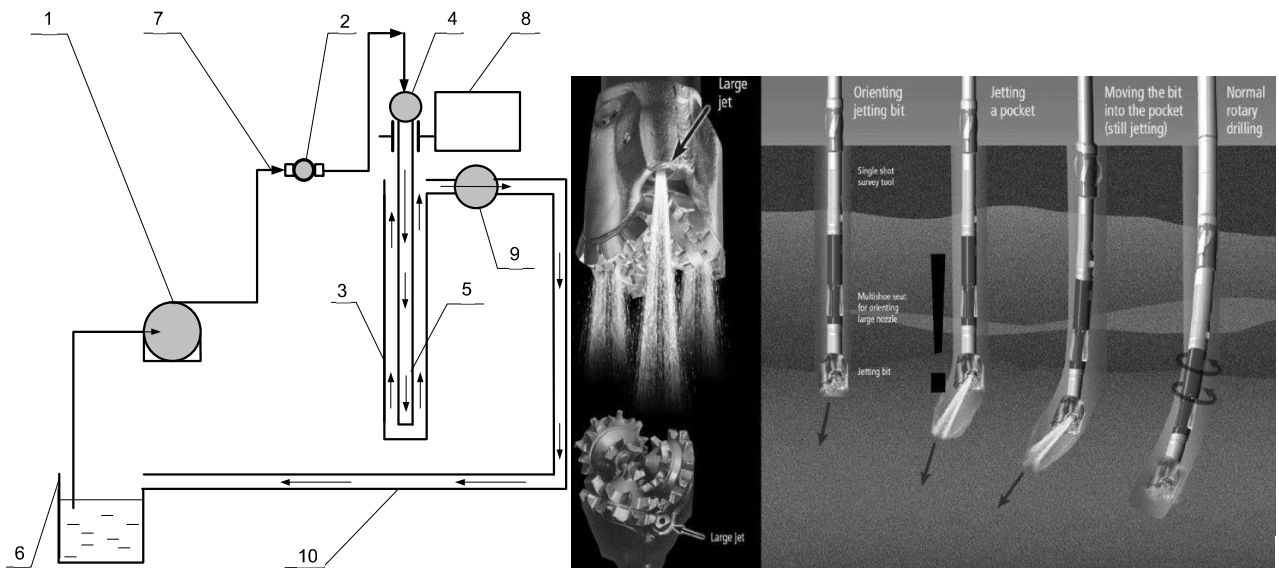


Рис. 2. Схема спеціальної стендової бурової

За результатами проведених досліджень фахівцями кафедри нафтогазової інженерії та буріння НТУ «ДП» було також розроблено спеціальний гідромоніторний бур [19], в якому інше конструктивне виконання взаємодіючих робочих вузлів та гнучкість режиму поверхневого керування забезпечують: реалізацію програми ефективного направленного руйнування гірського масиву активованими гідромоніторними струменями; розмірну компактність і рухливість пристрою відносно габаритних розмірів свердловин різного призначення; оперативність корегування гідравліко-силових характеристик активованого потоку робочої рідини; застосування пристрою в техніко-технологічних схемах буріння свердловин та послідовного розширення останніх в інтервалі продуктивних горизонтів; підвищення ступеню та досконалості використання гідравлічної й механічної потужності поверхневих бурових насосів; збільшення механічної й рейсової швидкості буріння; удосконалення системи розробки родовищ корисних копалин; зниження амортизації самого пристрою та основного й допоміжного бурового інструменту і за рахунок цього створення умови безперервності процесу формування стовбура свердловини при зниженні енергоємності.

Поставлене завдання було вирішено тим, що у відомому гідромоніторному бурі, який включає корпус, циркуляційний канал з гідромоніторною насадкою та буровий став, згідно із винаходом, його циркуляційний канал виконаний як гідромоніторна розгінна камера, охоплена кільцевим проточним електродом, по центру якої встановлено стрижневий електрод в ізоляційній оболонці з можливістю поздовжнього переміщення в ній та формування розгінної контактної електрогідравлічної ділянки; до того ж, корпус гідромоніторної розгінної камери закріплено рухливо до бурового ставу.

На рис. 3 наведена загальна схема гідромоніторного буру, де 1 – буровий став, утворений бурильними трубами 2, з'єднаними замками 3, а в нижній частині завершуваними поворотним механізмом 4 із гідромоніторною розгінною камерою 5, з підключенням до останньої електричного кабелю 6.

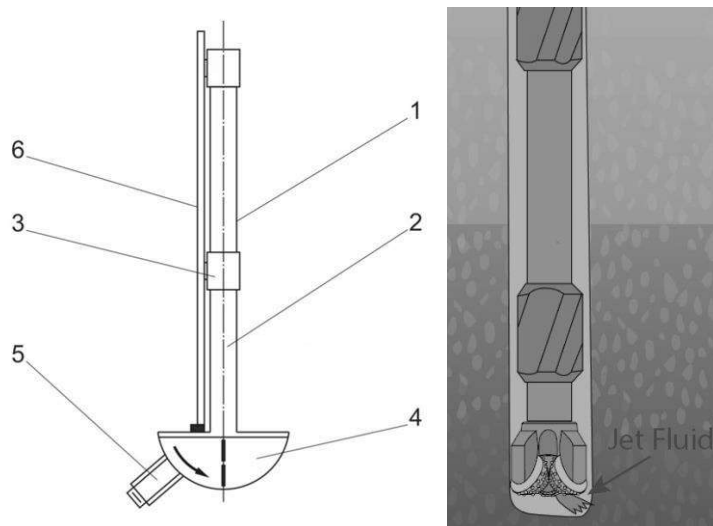


Рис. 3. Загальна схема гідромоніторного буру

Корпус гідромоніторної розгінної камери, завершуваний циркуляційним соплом [20], рухливо з'єднаний з буровим ставом; крім того, по його центру встановлено стрижневий електрод з утворенням розгінного контуру між ним, ізоляційною оболонкою, контактною електрогідрравлічною ділянкою та внутрішньою поверхнею корпусу. Електрогідрравлічна ділянка формується поздовжнім переміщенням ізоляційної оболонки накидною гайкою із захватами та підключенням стрижневого електроду, за допомогою електричного кабелю, до електричної загальнопромислової мережі бурової. Каналом потрапляння робочої рідини до розгінного контуру виступає вхідний отвір.

Схема роботи пропонованого пристрою полягає в наступному. Руйнування породного масиву здійснюють за спуску бурового ставу, утвореного бурильними трубами (які з'єднані замками), у свердловину та підключення, за допомогою електричного кабелю, змонтованої у поворотному механізмі гідромоніторної розгінної камери до електричної загальнопромислової мережі бурової. Щільне магнітне поле, яке рухає та різко збільшує швидкість рідини в розгінному контурі, формується таким чином. Розрядний струм тече в радіальному напрямі між електродами, одним з яких служить позитивний стрижневий електрод (сталевий стрижень з конусоподібним наконечником), розташований на вісі розгінної камери, а іншим – кільцевий проточний електрод. Радіальний розрядний струм взаємодіє з концентричним магнітним полем. Сила, спрямована уздовж вісі системи, сприяє прискоренню руху рідини, що поступає до розгінної камери через вхідний отвір. З міжелектродного простору, через циркуляційне сопло, активований струмінь рідини викидається зі швидкістю понад 1000 м/с, захоплюючи за собою і рідину, що рухається стовбуром свердловини та із значним швидкісним напором врізається в породний масив, тим самим проводячи руйнування останнього. Підвищення рівня сили впливу активованого струменя рідини та його швидкості, враховуючі задані руйнівні характеристики породного масиву, здійснюють за допомогою поздовжнього переміщення ізоляційної оболонки накидною гайкою із захватами, що супроводжується зростанням площі контактної електрогідрравлічної ділянки, тобто збільшенням напруженості магнітного поля. Безперервний перехід від циклу буріння до циклу розширення свердловини та зворотно забезпечується рухливістю встановлення розгінної камери. Вказане дозволяє ефективно формувати стовбур свердловини навіть в м'яких породах, схильних до набрякань, що виключає необхідність додаткових проробок та сприяє загальному зниженню енергоємності і часу на спорудження свердловин в безперервному управлінні процесом поглиблення вказаних гірських виробок різного призначення, ускладнених проявом гірничо-геологічних умов.

Ефективність роботи розглянутого пристрою в значній мірі визначається адекватністю отриманих попередніх розрахункових параметрів гідроруйнування, що є похідною фізико-механічних властивостей гірських порід і характеристик використовуваного обладнання [7].

Нормальне навантаження на пласт гірської породи, що руйнується гідромоніторним струменем, визначається наступною залежністю

$$G = \gamma_{\text{п}} \cdot g \cdot H, \text{ Па}, \quad (5)$$

де $\gamma_{\text{п}}$ – щільність гірських порід, що піддані руйнуванню кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; H – глибина залягання пласта, м. Тиск в просторі пор гірської породи

$$P_{\text{гидр}} = \gamma_{\text{в}} \cdot g \cdot H, \text{ Па}, \quad (6)$$

де $\gamma_{\text{в}}$ – густина ґрунтових вод, кг/м^3 .

Ефективні напруги в гірській породі

$$G_e = G - P_{\text{гидр}}, \text{ Па}. \quad (7)$$

Опір зсуву водонасичених гірських порід

$$\tau_s = C_0 + G_e \cdot \text{tg}\phi, \quad (8)$$

де C_0 – коефіцієнт зчеплення порід, Па; ϕ – кут внутрішнього тертя породи, град.

Мінімальна питома напруга удару активованого струменя [21], що необхідна для ефективного руйнування гірської породи

$$P_{y \text{ min}} > \tau_s. \quad (9)$$

Тиск води на вході в насадці

$$P_0 = P - \Delta P_c + \gamma_{\text{рр}} \cdot g \cdot H - \Delta P_{\Gamma}, \text{ Па}, \quad (10)$$

де P – тиск води, що розвиває насос (відповідно до технічної характеристики прийнятого обладнання), Па; ΔP_c – орієнтована втрата напору в технологічній сітці (обв'язуванні свердловини), $\Delta P_c = (0,020-0,050) \cdot 10^6$ Па; $\gamma_{\text{рр}}$ – густина робочої рідини (води) $\gamma_{\text{рр}} = 1000$ кг/м^3 ; ΔP_{Γ} – орієнтовані втрати напору в гідромоніторі, $\Delta P_{\Gamma} = (0,4-0,7) \cdot 10^6$ Па [22].

Початкова швидкість вильоту струменя з насадки

$$U_0 = k_u \sqrt{2 \cdot 10^{-3} \cdot P_0}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

де k_u – коефіцієнт швидкості, $k_u = 0,92-0,96$.

Витрата води в моніторі розраховується за формулою

$$Q = 0,25 \cdot \pi \cdot d_{\text{н}}^2 \cdot \alpha \cdot U_0, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (12)$$

де α – коефіцієнт стиснення струменя; приймається $\alpha = 1$; $d_{\text{н}}$ – діаметр насадки гідромонітора, м.

Коефіцієнт структури потоку активованого струменя

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1}{0,0625} - \frac{n P_{\text{гидр}}}{10^6}}, \quad (13)$$

де n – величина, що залежить від тиску гідромонітора (табл. 1).

Таблиця 1. Розрахункові коефіцієнти структури потоку струменя гідромонітору

Тиск в просторі пор гірської породи $P_{\text{гидр}}$, МПа	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Параметр n	1,87	1,471	1,002	0,561	0,2

Відстань від насадка до вибою свердловини, на якій можливе ефективне руйнування гірської породи

$$l = \frac{(1060 \cdot \tau_0^2 - 0,29 \tau_3) d_H}{2 \lambda \tau_3} \quad (14)$$

Розрахункова продуктивність гідравлічного руйнування гірських порід

$$\Pi = \frac{K P_0 \cdot 10^{-3}}{g} \quad (15)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від діаметру насадки (табл. 2).

Таблиця 2. Розрахункові коефіцієнти продуктивності гідравлічного руйнування гірських порід

Діаметр насадки гідромонітора d_H , м	11	15	23
Коефіцієнт K	1,2	2,0	4,8

Таким чином, розрахунок гідравлічного руйнування гірських порід зводиться до визначення мінімальної довжини струменя, витрати води (бурової промивальної рідини) і продуктивності свердловинного вибійного гідробура тієї або іншої конструкції. Саме тому повне і належне здійснювання усіх основних і допоміжних операцій при гідравлічному руйнуванні гірського масиву та у логічній відповідності до геолого-технічного завдання можливо лише за чіткої структурної організації виконання відповідних робіт.

Висновки

1. Надано послідовний критичний аналіз переваг і вад сучасних механічних способів спорудження свердловин (переважно обертальних), із зазначенням функціональних характеристик обладнання та інструменту, що забезпечує їх реалізацію в різних геолого-технічних умовах.

2. Представлений розгляд низки питань, що стосуються можливості більш широкого впровадження в практику спорудження свердловин технологій вибійного гідроруйнування масиву гірських порід безпосередньо активованими струменями промивальної бурової рідини, або в комбінації із спеціально адаптованим механічним інструментом.

3. Практична значимість роботи полягає у створенні, на підставі ґрунтовних стендових досліджень основних характеристичних параметрів процесу гідроруйнування, спеціального буру, застосування якого в техніко-технологічних схемах буріння свердловин забезпечує: стаке підвищення ступеню та досконалості використання гідравлічної і механічної потужності поверхневих бурових насосів; збільшення механічної та рейсової швидкості буріння; удосконалення системи розробки родовищ корисних копалин; зниження амортизації самого пристрою та основного й допоміжного бурового інструменту.

4. Подальші ґрунтовні експериментально-теоретичні дослідження особливостей проведення бурових робіт, за умов застосування елементів циклу гідравлічного руйнування гірської породи, повинні продовжуватися у напрямках створення алгоритмів і технологій розробки ефективної їх програми та змістовного наповнення, що якнайповніше відповідають принципам суттєвого скорочення енерговитрат та адекватності кінцевих геолого-технічних результатів.

A.O. Ihnatov, O.M. Davydenko, V.L. Khomenko, O.A. Pashchenko,
V.V. Yavorska, S.O. Shypunov, Ya.S. Tkachenko

National technical university «Dnipro Polytechnic», Ukraine

PROSPECTS FOR THE USE OF NON-MECHANICAL DRILLING METHODS

The presented results of experimental studies of the features of drilling operations are associated with the use of hydromonitor jets to intensify the destruction processes at the bottom of wells. These works were carried out with the involvement of modern methods of analytical analysis and relevant laboratory and bench studies, in particular, by using the general principles of mathematical and physical modeling, methods for processing research results, instrumentation and materials. The flow of hydraulic drilling downhole processes was modeled on experimental wells using drilling rigs, as well as appropriate tools and equipment.

Some formal features of widely used mechanical rotational methods of deepening bottomholes are outlined with the definition of the features of their technical and technological support in various geological and technical conditions. Separate structural elements of the technology for the production of borehole destruction processes using the phenomena of hydromonitor disintegration of the rock mass have been developed. The fundamental principles of the constructive construction of a laboratory base for the study of hydraulically activated jets of drilling fluid and the corresponding downhole tool – a hydraulic drill, are presented. It has been analytically and practically proven that the efficiency of the mechanisms under consideration is largely determined by the adequacy of the obtained preliminary design parameters of hydraulic fracture. Moreover, such parameters are a derivative of the physical, mechanical and chemical properties of rocks (drilling fluids), and the characteristics of the equipment used, technological tools, etc.

Separate components of an improved technological methodology and the corresponding technical support for performing well operations using the effect of hydraulic destruction of a rock mass based on modern progressive industrial principles and high economic indicators have been created and substantiated. The general and basic design characteristics of equipment and tools for performing work related to the adaptation of jetting phenomena to specific well conditions are presented. The data obtained are the basis for further developments to improve the quality and reliability of drilling and related operations when drilling wells using the basic principles of hydraulic destruction of the rock mass.

Key words: *well drilling, hydraulic monitor, nozzles, destruction of a rock mass, research experimental stand, hydraulic drill, activated liquid jet, multiphase flows.*

Література

1. Vaddadi N. Introduction to oil well drilling. – Bathos (U Vee Infosystems), 2015. – 204 p.
2. Войтенко В., Вітрик В. Технологія і техніка буріння. – Київ: Центр Європи, 2012. – 708 с.
3. Павличенко А.В., Коровяка Є.А., Ігнатів А.О., Давиденко О.М. Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. – Дніпро: НТУ «ДП», 2021. – 201 с.
4. Hossain M.E., Islam M.R. Drilling engineering: problems and solutions. – Wiley – Scrivener Publishing, 2018. – 627 p.
5. Коровяка Є.А., Ігнатів А.О. Прогресивні технології спорудження свердловин. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 166 с.
6. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. Mining of Mineral Deposits. – 2021. – Vol. 15, N 3. –P. 122–129.
7. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., et al. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1, 11-18.
8. Пащенко О.А., Ігнатів А.О., Владико О.Б. Деякі особливості руйнування гірського масиву на вибої свердловини // Інструментальне матеріалознавство. Зб. наук. пр. – Випуск 24. – К.: ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України, 2021. – С. 121–134.

9. 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 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 1049, N 1. id 012031, 14 p.
10. Ігнатів, А.О., Ратов, Б.Т., Ткаченко, Я.С., Шипунов, С.О., Ветошка, С.І. Розробка методичних та конструктивних основ буріння свердловин із застосуванням нових типів доліт // Збірник наукових праць НГУ. – 2022. – Вип. 69 – С. 218–230.
11. Ihnatov A., Koroviaka Ye., Rastsvietaiev V., Tokar L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling / Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons (GHT 2020): materials of IV International Scientific and Technical Conference // E3S Web of Conferences. 2021. – Vol. 230. – P. 01016.
12. Ihnatov A.O., Koroviaka Ye.A., Haddad J., Tershak B., Kaliuzhna T., Yavorska V. Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2022. – N 1, P. 20–27.
13. Hossain, M.E. Fundamentals of Drilling Engineering: MCQs and Workout Examples for Beginners and Engineers. – Wiley – Scrivener Publishing, 2016. – 854 p.
14. Lopez J. C., Lopez J. E., Javier A. C. F., Ramiro Y. V. Drilling and blasting of rocks. 1st Edition. – London: Routledge, 1987. – 408 p.
15. Azar J.J., Robello S.G. (2007). Drilling Engineering. – PennWell Corporation, 2007 – 486 p.
16. Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing systems. Modeling and analysis. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 338 p.
17. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation / Benyoucef L. (Ed.) // Springer Series in Advanced Manufacturing (SSAM). – Springer Cham, 2020. – 250 p.
18. Пат. 114761 Україна МПК E21B 47/00, F04B 51/00. Стенд для дослідження аерогідродинамічних потоків / О.М. Давиденко, А.О. Ігнатів, С.Ю. Дворник. – Опубл. 25.07. 17, Бюл. № 14.
19. Пат. 114761 Україна МПК E21B 47/00, F04B 51/00. Стенд для дослідження аерогідродинамічних потоків / О.М. Давиденко, А.О. Ігнатів, С.Ю. Дворник. – Опубл. 25.07. 17, Бюл. № 14.
20. Bansal, R.K. A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines. Laxmi Publications LTD, 2010. – 1102 p.
21. Modi P.N., Seth S.M. Hydraulics and Fluid Mechanics Including Hydraulics Machines. – Standard Book House, 2019. – 1419 p.
22. Табаченко М.М., Владико О.Б., Хоменко О.Є., Мальцев Д.В. Фізико-хімічна геотехнологія. – Дніпропетровськ: НГУ, 2012. – 310 с.

Надійшла 06.09.22

References

1. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos (U Vee Infosystems).
2. Voitenko, V., & Vitryk, V. (2012). *Tekhnolohiia i tekhnika burinnia [Technology and technique of drilling]*. Kyiv: Center of Europe [in Ukrainian].
3. Pavlychenko, A.V., Koroviaka, Ye.A., Ihnatov, A.O. & Davydenko, A.N. (2021). *Hidrohadzodynamichni protsesy pry sporudzhenni ta ekspluatatsii sverdlovyn: monograph [Hydro-gas-dynamic processes during the construction and operation of wells]*. – Dnipro: Dnipro University of Technology [in Ukrainian].
4. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Wiley – Scrivener Publishing.

5. Koroviaka, Ye.A. & Ihnatov, A.O. (2020). *Prohresyvni tekhnolohii sporudzhennia sverdlovyh: monograph [Advanced well construction technologies]*. Dnipro: Dnipro University of Technology [in Ukrainian].
6. Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 15, 3, 122–129.
7. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Pinka, J., et al. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 11–18.
8. Pashchenko, O.A., Ihnatov, A.O., & Vladyko, O.B. (2021). Deiaki osoblyvosti ruinovannia hirs'koho masyvu na vyboi sverdlovyh [Some features of rock destruction at the bottom of the well]. *Instrumentalne materialoznavstvo - Tooling materials science*, 24, 121–134 [in Ukrainian].
9. Pavlychenko, A.V., Ihnatov, A.O., Koroviaka, et al. (2022). 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*, 1049, 012031.
10. Ihnatov, A., Ratov, B., Tkachenko, Ya., Shypunov, S., & Vetoshka, S. (2022). Rozrobka metodychnykh ta konstruktyvnykh osnov burinnia sverdlovyh iz zastosuvanniam novykh typiv dolit [Development of methodological and constructive foundations for drilling wells using new types of bits]. *Zbirnik naukovykh praz NHU –Collection of research papers of the NMU*, 2(69), 218–230 [in Ukrainian].
11. Ihnatov, A., Koroviaka, Ye., Rastsvietaiev, V., et al. (2021). Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons-2020. E3S Web of Conferences*, 230, 01016. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001016>.
12. Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Haddad, J., et al. (2022). Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 20–27.
13. Hossain, M.E. (2016). *Fundamentals of Drilling Engineering: MCQs and Workout Examples for Beginners and Engineers*. Wiley – Scrivener Publishing.
14. Lopez J. C., Lopez J. E., Javier A. C. F., & Ramiro Y. V. *Drilling and blasting of rocks. 1st Edition*. London: Routledge.
15. Azar, J.J., & Robello, S.G. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Books.
16. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2011). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
17. 12. Benyoucef, L. (Eds.). (2020). *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer Cham.
18. Davydenko O.M., Ihnatov A.O., & Dvornik S.Yu. (2017). Patent of Ukraine 114761 [in Ukrainian].
19. Aziukovskii O.O., Pavlychenko A.O., Ihnatov A.O., et al. (2022). Patent of Ukraine 151461. [in Ukrainian].
20. Bansal, R.K. (2010). *Hydraulics and fluid mechanics*. Laxmi Publications LTD.
21. Modi, P.N., & Seth, S.M. (2019). *Fluid mechanics and hydraulic machines*. Standard Book House.
22. Tabachenko, M.M., Vladyko, O.B., Khomenko, O.Ye. et al. (2012). *Fizykokhimichna heotekhnolohiia [Physical and chemical geotechnology]*. Dnipropetrovsk: NHU [in Ukrainian].