

- *Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (22nd Issue, p. 164–174). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].
10. Seniushkovych, M.V., Tershak, B.A., Vytvytskyi, I.I., Martsynkiv O.B. (2022). *Spetsialni tamponazhni systemy*. IFNTUNH [in Ukrainian].
 11. Vytyaz, O., Chernova, O., Stavychnyi Ye., et al. (2024). Increasing the reliability of oil and gas well fastening with polycomponent plugging systems. *Mining of Mineral Deposits*, 18(3), 82–93.
 12. Davidenko, A. Ighnatov, A. (2016). Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 58–64.
 13. Stavychnyi, Ye.M., Mahun, M.Ia., Zinkov, R.V. (2008). Dosvid sporudzhennia sverdlovyn na Voloshkivskii ploshchi v umovakh proiavlennia tekuchosti kaliievo-mahniievkykh solei [Experience of well construction in the Voloshkovskaya area under conditions of potassium-magnesium salt fluidity]. *Naftova i hazova promyslovist – Oil and gas industry*, 4, 34–36. 407 [in Ukrainian].
 14. Terlyha, V S., Sobol, Kh.S., Petrovska, N.I., Kovalchuk. M.B. (2013). Fyzyko-mekhanichni vlastyvoli modyfikovanykh polehshenykh tamponazhnykh sumishei [Physical and mechanical properties of modified lightweight cement mixtures]. *Teoriia i praktyka budivnytstva – Theory and practice of construction*, 755, 417–421 [in Ukrainian].
 15. Curry, G.L. & Feldman, R.M. (2011). *Manufacturing systems. Modeling and analysis*. Springer-Verlag.
 16. Pavlychenko, A.V., Ihnatov, A.O., Koroviaka, Ye.A., Ratov B T and Zakenov S T et al/ (2022). Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012031.
 17. Voitenko, V., & Vitryk, V. (2012). *Tekhnolohiya i tekhnika burinnya [Technology and technique of drilling]*. Center of Europe [in Ukrainian].
 18. Davydenko, O.M., Ihnatov, A.O., Yatsyk V.V. (2010). Patent of Ukraine 90541 МПІК E21B37/02. *Prystrij dlia obrobky stovbura sverdlovyny [Device for treating a wellbore]*. (Patent Ukraine № 90541) [in Ukrainian].
 19. Davydenko, O.M., Ihnatov, A.O., Dvornyk, S.Y. (2017). Patent of Ukraine 114761. МПІК E21B47/00. *Stend dlia doslidzhennia aerohidrodynamichnykh potokiv [Stand for studying aerohydrodynamic flows]*. (Patent Ukraine № 114761) [in Ukrainian].
 20. Horskyi, V. F. (2006). *Cementing materials and solutions*. Chernivtsi [in Ukrainian].

УДК 622.243.95

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-117-133

А.О. Ігнатів, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького,
19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: A_3000@i.ua

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ СКЛАДОВІ ГІДРОМЕХАНІЧНОГО БУРІННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ НИМ

В статті обґрунтовано раціональні конструктивні і технологічні параметри модернізованих засобів гідромеханічного буріння на підставі встановлених закономірностей процесу взаємодії рухливих твердих куль із породним масивом у привибійній частині свердловини, що забезпечує підвищення ефективності буріння свердловин.

Встановлено обмеження традиційних кулеструминних і механічних методів буріння в складних гірничо-геологічних умовах. Обґрунтовано доцільність переходу до гідромеханічних схем руйнування

порід, що поєднують механічні та гідродинамічні (пневмодинамічні) впливи. Запропоновано принципові конструктивні елементи для нових пристроїв. Продемонстровано переваги комбінованих схем руйнування гірських порід, де робочі фактори діють узгоджено. Показано, що координація ударної та обертальної компонент підвищує сколювальний ефект у контакті «куля - порода» при збереженні прийнятних експлуатаційних навантажень. Обґрунтовано необхідність впровадження систем саморегулювання режимів роботи гідромеханічних пристроїв. Запропоновано підхід, за якого параметри удару й обертання адаптуються залежно від форми вибою, кривизни та фактичного опору породи, що підвищує стійкість процесу і знижує ризик аварійних ситуацій. Показано, що впровадження адаптивних систем управління в реальному часі дозволяє формувати надійні алгоритми керування режимами обертання й формування ударних імпульсів.

Запропоновано концепцію гідромеханічного буріння з адаптивним керуванням енергетичними параметрами, розроблено принципові комбіновані конструкції відповідних пристроїв з автономними приводами, у яких запроваджено механізм саморегулювання режимів формування ударних навантажень та обертання залежно від форми вибою і опору породи, а також визначено критерії оптимізації взаємодії в системі «куля - гірська порода» та засади адаптивних алгоритмів керування ними в реальному часі.

Ключові слова: гідромеханічне буріння, свердловина, вибій, технологічний процес, гірська порода, механізм саморегулювання, конструкція пристрою, породоруйнівна куля, деформація, енергетичні параметри.

Постановка проблеми

Сучасний стан справ у галузі спорудження свердловин, як окремого класу специфічних гірничих виробок, та в її неодмінній складовій – циклі руйнування гірських порід – переконливо свідчить про наявність широкого спектра способів і технологічних підходів до формування стовбура свердловини в масиві гірських порід за різних геолого-технічних умов [1].

Велика різноманітність використовуваних нині способів буріння зумовлена, з-поміж іншого, наступними факторами: великим діапазоном умов розробки родовищ; вельми значними відмінностями фізико-механічних показників гірських порід; необхідністю врахування наявних термобаричних режимів; специфікою технічного оснащення та вимог до якості й промислового призначення стовбура свердловини; об'єктивною необхідністю спорудження значної кількості свердловин, які відрізняються як за глибиною, так і за просторовим розташуванням у товщі гірських порід із широким діапазоном механічних властивостей. Саме масовий характер виконання свердловинних робіт висуває суворі вимоги до раціоналізації технологій буріння та підвищення їхньої ефективності [2]. Така ситуація є прямим результатом багатоваріантності задач, що виникають та вирішуються у процесі буріння, серед яких провідне місце посідають: необхідність отримання репрезентативних кернових зразків гірських порід і продуктивних товщ, а також формування надійного, експлуатаційно-придатного каналу для видобування корисних копалин з різними фізико-хімічними властивостями.

Приймаючи до уваги доволі значну капіталомісткість процесу спорудження свердловин, що зумовлена, зокрема, великими їх глибинами і закономірним ускладненням геолого-технічних умов провідки названих гірничих виробок, зрозумілим стає прояв особливої уваги дослідників до вдосконалення існуючих або розроблення новітніх способів руйнування гірського масиву, які забезпечують максимально можливу безперервність операції поглиблення вибою свердловини з якомога більшою швидкістю. Суть зазначеного можна розгорнуто пояснити в такий спосіб: запропонований до застосування спосіб буріння має відповідати вимогам відносно забезпечення стійкості породоруйнівного інструменту, що дає змогу мінімізувати витрати часу на виконання відносно тривалих допоміжних операцій, пов'язаних із його заміною; крім того, робота цього інструменту повинна бути за можливості ізольована від дії факторів, які порушують стабільність заданого технологічного режиму поглиблення вибою свердловини. На заводі вказаному дуже часто стає присутність повністю

об'єктивного впливу різноманіття фізико-механічних та хімічних властивостей гірського масиву, які активно проявляються під час його деформування в процесі руйнування [3].

Таким чином, процес буріння невід'ємно супроводжується дією низки технологічних обмежень, зумовлених відповідними вимогами до свердловини, а також чітко регламентованим діапазоном функціональних можливостей застосовуваного обладнання та породоруйнівного інструменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Прийняті до уваги фактичні матеріали щодо провідних тенденцій у сфері розв'язання практичних задач гірничої та видобувної галузей свідчать про те, що переважна більшість існуючих способів руйнування гірських порід, які активно застосовуються на практиці (зокрема й під час буріння свердловин різного призначення), базується виключно на механічному впливі на гірський масив з метою його поділу на окремі фрагменти різних розмірів під дією локалізованих руйнівних зусиль, величина яких повинна перевищувати сили внутрішніх зв'язків у гірській породі [4]. Руйнівні зусилля в породі при цьому формуються внаслідок дії твердих породоруйнівних інструментів на контактних ділянках їх взаємодії з поверхнею вибою свердловини, коли локалізовані нормальні та дотичні навантаження перевищують міцнісні характеристики гірського масиву й зумовлюють його фрагментацію.

При позначених нами умовах подальший розвиток і удосконалення, переважно, стосуються саме породоруйнівного інструменту, тоді як базові принципи реалізації застосовуваних способів буріння загалом залишаються незмінними. Вказане дало змогу істотно підвищити ресурс ефективної роботи інструменту, раціоналізувати схеми відпрацювання його озброєння, оптимізувати механічну швидкість буріння та спростити конструктивне виконання інструменту і режимні параметри його роботи [5]. Проблематика цих питань особливо виявляється у складності, а подекуди й неможливості забезпечення ефективного руйнування порід середньої, а тим більше високої твердості; також труднощі формування стовбура свердловини виникають у масивах гірських порід із частою зміною показників твердості [6].

Можемо обґрунтовано стверджувати, що набуває актуальності пошук та впровадження альтернативних підходів до руйнування гірських порід, здатних забезпечити підвищення ефективності робіт у складних умовах [7].

На теоретичному рівні опрацьовано й у тій чи іншій мірі практично реалізовано низку тих способів руйнування гірського масиву (переважно фізичного характеру) [8], які ґрунтуються на використанні внутрішніх сил і зв'язків гірського масиву, активізованих під дією температурних, електромагнітних та інших полів, у тому числі таких, що зумовлюють докорінну зміну його стану (наприклад, зміну агрегатного стану).

Результати провадження на практиці новітніх способів залишаються наразі обмеженими: подібні технології здебільшого застосовують у спеціальних умовах, оскільки вони характеризуються підвищеною енергоємністю, складністю апаратурного оформлення, істотними вимогами до надійності та безпеки обладнання, а також необхідністю інтеграції з наявними системами бурового комплексу; вказане, власне, і стримує їх широке використання при спорудженні свердловин різного призначення в промислових масштабах [9].

Таким чином, аналітичний огляд сучасних досліджень і публікацій дає підстави стверджувати, що, попри наявність перспективних фізичних способів впливу на гірський масив, домінуюче становище в практиці буріння й надалі посідають методи механічного руйнування порід, а підвищення ефективності процесу буріння переважно пов'язане з удосконаленням породоруйнівного інструменту та режимів його роботи. В цьому контексті особливої наукової та прикладної актуальності набувають дослідження, спрямовані на розроблення та обґрунтування техніко-технологічних рішень, які забезпечують

інтенсифікацію процесу руйнування порід і підвищення ефективності спорудження свердловин у складних гірничо-геологічних умовах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Повністю логічним є припущення про те, що вдосконалення процесу буріння можна досягти лише за умови комплексного вивчення всіх його складових у їхній внутрішній взаємодії та взаємообумовленості [10]. Іншими словами, буровий процес має розглядатися як цілісна система, в межах якої конструктивні особливості породоруйнівного інструменту, використовувані ефекти додаткового впливу на гірський масив, властивості самого гірського масиву, режими руйнування порід, параметри промивальної рідини, характеристики обладнання та організаційно-технологічні рішення не є ізольованими елементами, а формують сукупність взаємопов'язаних факторів, що спільно визначають кінцеву ефективність спорудження свердловин [9].

Сформульоване нами завдання є вкрай складним через відсутність можливості безпосереднього дослідження руйнування масиву, що суттєво обмежує якісну та кількісну оцінку натурних процесів руйнування гірських порід на вибої свердловини. У зв'язку з цим лише комплексне вивчення окремих складових багатофакторних вибійних процесів дає змогу сформулювати реалістичну картину поглиблення вибою та супровідних йому явищ [8].

У технології буріння процес поглиблення свердловини прийнято поділяти на окремі рейси, тривалість яких у більшості випадків визначається ресурсом ефективної роботи породоруйнівного інструменту. Розвиваючи зазначене, слід відмітити, що особливо в твердих породах виникає потреба у доволі частому підйомі бурильної колони з метою заміни зношеного інструменту на її нижньому кінці [6]; це і можна вважати головним поштовхом до створення пристроїв і технологій, спрямованих на збільшення тривалості рейсу, зокрема шляхом застосування знімного вибійного інструменту та твердих куль як механічних елементів, які безпосередньо взаємодіють із гірською породою на вибої, руйнуючи її. Водночас результати дослідно-промислового впровадження цих рішень показали, що їхній потенціал реалізується нерівномірно. Практичні випробування технологічного підходу із застосуванням куль дали змогу виявити як його переваги (збільшення тривалості рейсу, зниження простоїв на спуско-підіймальні операції, можливість інтенсифікації руйнування міцних гірських порід), так і суттєві недоліки, пов'язані зі складністю керування процесом подачі куль на вибій та їх взаємодії з ним, підвищеною абразивною дією на елементи бурового снаряду, а також певними обмеженнями щодо умов ефективного застосування цього способу [7].

Разом із тим, результати аналізу літературних і виробничих відомостей, а також лабораторно-теоретичних досліджень засвідчили наявність значного, нині практично нереалізованого потенціалу методу, фактично забутого в практиці бурових робіт, а саме гідромеханічного. В розглядуваному випадку йдеться про поєднання механічної дії спеціальних породоруйнівних інструментів із гідравлічною енергією спрямованого потоку рідини, що переміщує тверді кулі [3]; такий підхід відкриває додаткові можливості для інтенсифікації процесу руйнування порід і підвищення ефективності поглиблення свердловин у складних гірничо-геологічних умовах.

На підставі результатів проведеного аналізу сучасних техніко-технологічних рішень у сфері буріння свідчить про майже вичерпання резервів подальшого підвищення ефективності лише за рахунок удосконалення традиційних механічних способів руйнування порід. Виявлений науково-практичний потенціал гідромеханічного методу з використанням твердих куль зумовлює доцільність його поглибленого дослідження, параметричної оптимізації та адаптації до реальних умов спорудження свердловин.

Мета статті полягає в обґрунтуванні раціональних конструктивних і технологічних параметрів модернізованих засобів гідромеханічного буріння на підставі встановлених

закономірностей процесу взаємодії рухливих твердих куль із породним масивом в привибійній частині свердловини.

Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики

Використана методика передбачала аналіз та експериментальні дослідження з застосуванням окремих прийомів математичного і фізичного моделювання, методик теоретичної обробки та інтерпретації результатів, а також відповідного контрольно-вимірювального обладнання, інструментарію та матеріалів. Теоретично та експериментально досліджувалася взаємодія рухливих твердих куль із породним масивом у привибійній частині свердловини, на основі чого коректувалися конструктивні рішення модернізованих засобів гідромеханічного буріння. Моделювання процесу буріння в лабораторних умовах з аналізом та обробкою отриманих даних здійснювалося з метою встановлення закономірностей роботи, підвищення ефективності та надійності конструкцій, а також розробки рекомендацій щодо впровадження модернізованих пристроїв у виробництво.

Виклад основного матеріалу дослідження

Приймаючи до уваги отримані нами результати огляду стану справ у сфері вдосконалення техніко-технологічних основ буріння свердловин за складних умов [10], можна стверджувати наступне: натеper постає доволі гостра потреба у пошуку та розвитку нових техніко-технологічних рішень, здатних забезпечити більш ефективну реалізацію гідро(пневмо)механічних принципів руйнування гірських порід. Відповідно до сформульованого завдання, базовим концептуальним підґрунтям пропонованої технології є спосіб кулеструминного буріння (*pellet impact drill*), уперше апробований під час спорудження свердловин дослідниками зі США [12]. Разом із тим, створені для його реалізації технічні засоби в процесі експлуатації виявили як суттєву обмеженість області свого раціонального застосування, так і помітну конструктивно-технологічну недосконалість. Зазначені обставини обґрунтовано зумовили необхідність подальшого розвитку ідеї кулеструминного буріння, зокрема через формування нових, більш досконалих конструкцій пристроїв гідромеханічного буріння та оптимізацію умов їх роботи.

Передумовою конструктивного вдосконалення технічних засобів кулеструминного, а більш коректно – гідромеханічного буріння, стали виявлені на практиці обмеження та недоліки традиційних кулеструминних і механічних способів. Сукупність гірничо-геологічних ускладнень, технологічних обмежень та експлуатаційних проблем (нерівномірний профіль вибою, погіршення обробки периферійної зони, поглинання промивальної рідини, робота в надмірних породах і за умов відсутності стабільного постачання компонентів промивальної рідини) спричинили необхідність у створенні нових конструктивно й функціонально відмінних пристроїв, здатних забезпечити безперервність та інтенсифікацію процесу буріння свердловин [6].

Розвиток технологій гідромеханічного буріння зумовив потребу в створенні комбінованих схем руйнування, у яких механічні й гідродинамічні (або пневмодинамічні) фактори діють узгоджено. Для цього виникла необхідність: у спеціалізованих органах формування периферійної зони (кільця, матриці, коронки з пазами), здатних «відбирати» кулі або їх уламки й організувати їх роботу в зоні контакту зі стінками свердловини; у введенні автономних джерел обертального та/або ударного навантаження (турбінні, гвинтові, гідро- та пневмоударні приводи), що дозволяють підвищити локальний тиск і сколювальний ефект у парі «куля - порода» без непропорційного збільшення осьового навантаження на всю бурильну колону; в забезпеченні саморегульованості процесу, коли режим роботи ударного або гідро(пневмо)динамічного вузла автоматично змінюється залежно від форми вибою, ступеня кривизни та фактичного опору гірської породи.

Окремим блоком обставин виникнення інноваційних підходів стало поширення умов, за яких традиційні промивальні рідини не можуть бути використані ефективно [13]: зони з

вираженими колекторськими властивостями, де спостерігаються інтенсивні поглинання й повна втрата циркуляції, а також райони з обмеженим або відсутнім водопостачанням. Це зумовило перехід до схем, де робочим середовищем є стиснене повітря, що одночасно виконує функції енергетичного агента для пневмоударника, транспортного середовища для куль і засобу очищення вибою. Сукупність цих техніко-експлуатаційних суперечностей і стала фактичною передумовою появи низки технічних рішень, спрямованих на підвищення інтенсивності руйнування порід, розширення діапазону застосування кулеструминних пристроїв і забезпечення безперервності буріння в складних умовах (табл. 1) [14–17].

Таблиця 1. Аналіз передумов виникнення інноваційних винахідницьких рішень в області гідро(пневмо)механічного буріння

Ключова технічна ознака технічного рішення та його умовне позначення	Головна передумова виникнення винаходу	Типові умови застосування	Головний недолік попередніх технічних рішень	Вирішені завдання при проектуванні конструкції пристрою
1	2	3	4	5
Гідромеханічний пристрій для буріння з турбінним приводним апаратом ГПБ-1В	Нестабільний профіль вибою, неякісна обробка периферії вибою при звичайному кулеструминному бурінні	Вертикальні та слабо викривлені свердловини	Формування параболічного вибою, падіння механічної швидкості, зупинка поглиблення	Кероване формування периферійної зони, стабільний профіль вибою, краще використання куль у зоні стінок
Гідромеханічний пристрій для буріння з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г	Недостатня ефективність у твердих та змінних за міцністю породах, особливо при викривленні стовбура	Криволінійні, похило-скеровані свердловини в міцних породах	Обмежена область раціональної роботи, конструктивна складність попередніх пристроїв	Автономне обертання вибійного органу, стабільна робота матриці з уламками куль, інтенсифікація руйнування периферії вибою
Гідромеханічний пристрій для буріння з гідроударником ГПБ - 1ГУ	Низька ефективність при обробці периферії вибою й надміцних порід лише за рахунок циркуляції куль	Міцні породи, ускладнені форми вибою, великі зенітні кути	Відсутність комбінованого (ударно-обертального) механізму; неможливість підтримувати руйнування криволінійних стінок	Саморегульований ударно-обертальний режим, передача ударів через коронку на кулі, стійке формування прямокутного вибою

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5
Пневмомеханічний пристрій для буріння з пневмоударником ГПБ - 1ПУ	Поглинання промивальної рідини з втратою циркуляції, дефіцит компонентів промивальної рідини	Свердловини з колекторськими властивостями, зони поглинання, регіони з обмеженим водопостачанням	Неможливість безперервної роботи при втраті циркуляції, відсутність автономного ударного джерела при роботі із продувкою	Використання стисненого повітря як енергетичного середовища, автономний ударно-обертальний режим, робота в умовах поглинань

Пропоновані технічні рішення (табл. 1) є логічною відповіддю на обмежену ефективність традиційного кулеструминного буріння, особливо в ускладнених гірничо-геологічних і експлуатаційних умовах. Кожне рішення поєднує механічну дію куль із додатковим локальним джерелом енергії (турбіна, гвинтовий двигун, гідро- або пневмоударник) для інтенсифікації руйнування периферійної зони. Технічні рішення дозволяють розв'язати вузькі недоліки експлуатації класичних пристроїв кулеструминного буріння, а саме: стабілізують профіль вибою, дозволяють роботу пристрою в криволінійних ділянках і міцних породах, допускають саморегулювання процесу руйнування та роботу при активному поглинанні промивальної рідини і втраті циркуляції. Загальна мета розробки пристроїв полягає в підвищенні рейсової швидкості, зменшенні простоїв й зношення обладнання та розширенні діапазону застосування кулеструминних принципів технології гідромеханічного буріння.

Будемо вважати доцільним, що з метою комплексної оцінки ефективності запропонованих нами до застосування в промислових масштабах технічних рішень вельми важливим є проведення порівняльного аналізу їх експлуатаційних характеристик. Такий підхід дозволяє встановити переваги та обмеження для кожного з варіантів конструктивного виконання пристроїв гідромеханічного буріння, визначити сферу їх раціонального застосування та окреслити напрями подальшого удосконалення технології; нижче, в табл. 2, наведено узагальнені результати такого порівняння.

Таблиця 2. Порівняння експлуатаційних характеристик пристроїв гідро(пнеumo)механічного буріння свердловин

Характеристичний параметр пристрою або технології буріння	Модель пристроїв гідро(пнеumo)механічного буріння свердловин			
	Гідромеханічний з турбінним приводним апаратом ГПБ - 1В	Гідромеханічний з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г	Гідромеханічний для буріння з гідроударником ГПБ-1ГУ	Пневмомеханічний для буріння з пневмоударником ГПБ-1ПУ
1	2	3	4	5
Основне джерело енергії	Гідродинаміка (потік рідини)	Гідродинамічний привід гвинта	Гідравлічні ударні імпульси	Стиснене повітря (пнеumoпривод)
Обробка периферійної зони	Добра (кільце захоплює кулі)	Добра (матриця утримує уламки)	Висока (удар + обертання через коронку)	Висока (зубці + ударні імпульси)

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5
Саморегулювання під зміну профілю	Середнє	Високе	Високе (автозапуск гідроудару)	Високе (автономне включення пневмоудару)
Працездатність у криволінійних/похилих свердловинах	Обмежена	Хороша	Середня/хороша	Дуже хороша
Ефективність у міцних/надміцних породах	Середня	Вища	Висока	Висока
Залежність від циркуляції рідини	Висока	Висока	Висока	Низька (працює на повітрі)
Застосовуваність при поглинаннях	Низька	Низька	Низька	Висока
Складність конструкції та обслуговування	Середня	Вища	Вища	Середня/вища
Ризики/негативні ефекти	Енергоємність, абразивний вплив	Механічний знос гвинта	Підвищені динамічні навантаження	Абразивна дія, потреба в компресорі
Очікуваний техніко-економічний ефект	Помітний	Помітний/вищий	Високий	Високий (особливо при відсутності води)

Проведений нами аналіз порівняльних експлуатаційних характеристик свідчить, що запропоновані технічні рішення мають суттєві переваги над попередніми аналогами; зокрема, удосконалення конструкції та оптимізація параметрів взаємодії робочих елементів із породним масивом забезпечують стабільнішу роботу системи, зменшення вібраційних навантажень на бурильну колону і втрат енергії в гідравлічному контурі. Підвищена ефективність перетворення енергії потоку рідини в механічну дію сприяє більш рівномірному руйнуванню гірських порід, що позитивно впливає на швидкість поглиблення вибою свердловини та збільшує міжремонтний інтервал роботи відповідного вибійного інструменту та пристроїв. Крім того, покращення показників надійності та довговічності сприяє істотному зниженню експлуатаційних витрат і простоїв обладнання, що є ключовим чинником у складних гірничо-геологічних умовах. У цілому, отримані результати переконливо підтверджують техніко-економічну доцільність впровадження модернізованих пристроїв у промислову практику буріння свердловин.

Табл. 3 демонструє принципові конструктивні ознаки нових технічних рішень для гідро(пнеumo)механічного буріння свердловин, акцентуючи увагу на тих елементах конструкцій, які безпосередньо впливають на ефективність руйнування породи, стабільність процесу буріння та інтенсивність роботи. Вона дозволяє наочно порівняти взаємозв'язок між складовими пристрою, їх функціональним призначенням та очікуваним технічним результатом, включно з підвищенням рейсової швидкості, зменшенням навантажень на механічні елементи та забезпеченням саморегулювання процесу буріння в умовах складної

геології та змінних фізико-механічних характеристик гірських порід. Такий підхід спрощує аналіз переваг окремих рішень, допомагає виявити їхній потенціал для застосування в різних умовах експлуатації та сприяє обґрунтованому вибору оптимальної конструкції для конкретних задач буріння.

Таблиця 3. Ключові конструктивні характеристики інноваційних рішень для гідро(пневмо)механічного буріння свердловин

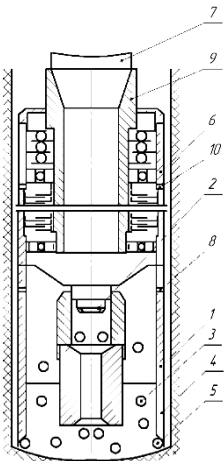
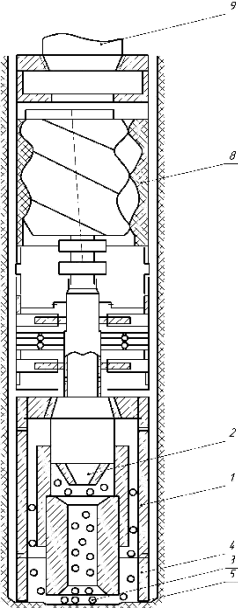
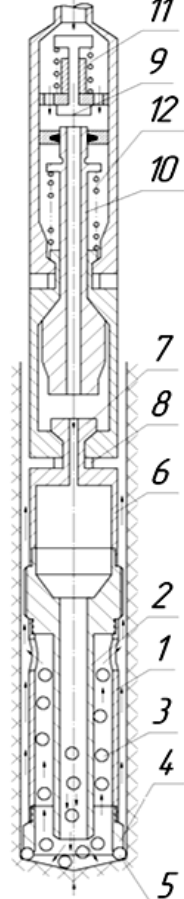
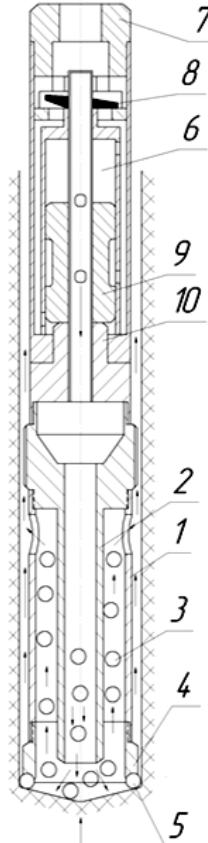
№	Характеристична конструктивна ознака розглянутих пристроїв	Сутність запропонованого технічного рішення	Очікуваний технічний ефект
1	Комбінована дія: механіка + динаміка середовища	Поєднання механічного впливу куль (абразивність/удар) з гідро- або пневмодинамічними імпульсами	Інтенсифікація процесу руйнування периферії; зростання механічної і рейсової швидкості
2	Акумулюючи органи формування периферії (кільця, матриці, коронки)	Орієнтовані пази/гнізда для захоплення куль або уламків; пористі/зубчасті поверхні	Стабілізація профілю вибою; ефективна обробка криволінійних стінок
3	Локальні приводи обертання/удару (турбіна, гвинт, гідро/пневмоударник)	Автономні механізми, незалежні від повного підйому колони	Місцеве підвищення сколювального зусилля без збільшення осьового навантаження
4	Система «фільтрації/утримання» уламків	Пористі осередки або пази, що акумулюють дрібні фрагменти куль/породи	Використання продуктів руйнування як активного абразиву; продовження ресурсу рейсу
5	Модульна та ремонтпридатна конструкція	Знімні матриці/кільця/коронки, легкодоступні вузли	Швидка заміна, менше простоїв, зниження операційних витрат
6	Адаптивний розподіл потоку (каналізація, інжекція)	Орієнтація та перерозподіл потоку для цільової подачі куль/повітря	Підвищення ефективності транспортування куль; зменшення енерговтрат
7	Робоче середовище за умов поглинань (пневматичний режим)	Можливість роботи на стисненому повітрі або комбінованих середовищах	Робота при втраті циркуляції/відсутності промивальної рідини; автономність в складних умовах
8	Саморегулювання режиму (автозмикання удару/обертання)	Механічні або гідродинамічні виконавчі вузли, що вмикають ударний вузол при зміні профілю	Автоматичне включення додаткового механізму при ускладненні форми вибою; мінімізація втручання оператора

Наведені в табл. 3 відомості наочно демонструють ключові конструктивні ознаки запропонованих технічних рішень для гідро(пневмо)механічного буріння свердловин, показуючи взаємодію основних елементів – корпусу, коронки, пневмо(гідро)ударника, зубчастих пазів та породоруйнівних куль – для забезпечення ефективного ударно-обертального механізму. Позначені відомості ілюструють, як передача ударних імпульсів через корпус на коронку та кулі

гарантує безперервність буріння навіть при криволінійній формі вибою, підвищує інтенсивність робіт і рейсову швидкість буріння. В табл. 3 також виділено переваги автономної роботи в умовах обмеженого водопостачання або поглинання промивної рідини та продемонстровано зменшення навантажень на механічні елементи при бурінні в міцних породах. Проведене нами порівняння дозволяє оцінити інноваційність запропонованих рішень, які поєднують ударно-обертальний та кулеструмінний способи буріння, забезпечують саморегулювання і підвищену надійність розглядуваних пристроїв. Систематизація охарактеризованих ознак у таблиці дає змогу визначити оптимальні технічні рішення для різних умов буріння та підкреслює практичну значимість кожного конструктивного вдосконалення.

Нами також здійснено детальний порівняльний аналіз, результати якого представлені в табл. 4, функціонального призначення окремих деталей розглядуваних бурових пристроїв.

Таблиця 4. Порівняння ключових конструктивних характеристик сучасних пристроїв для гідро- та пневмомеханічного буріння свердловин

№	Конструктивна або функціональна ознака	Найменування моделі гідро(пневно)механічного пристрою			
		Гідромеханічний з турбінним приводним апаратом ГПБ - 1В	Гідромеханічний з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г	Гідромеханічний для буріння з гідрударником ГПБ - 1ГУ	Пневмомеханічний для буріння з пневмударником ГПБ - 1ПУ
1	2	3	4	5	6
1	Ідея конструктивного оформлення пристрою				

Закінчення таблиці 4

1	2	3	4	5	6
2	Тип корпусу	Порожнистий корпус 1, нижня частина його оснащена спеціальним породоруйнівним кільцем 4; верхня – з'єднана з турбінним двигуном 6	Порожнистий корпус 1, нижня частина його з'єднана з матрицею 4; верхня – з гвинтовим двигуном 8	Порожнистий корпус 1, нижня частина його з'єднана з коронкою 4; верхня – гідроударником 6	Порожнистий корпус 1, нижня частина його з'єднана з зубчастою коронкою 4; верхня – пневмоударником 6
3	Розташування струминного апарату	Струминний апарат 2 концентрично в корпусі 1	Концентрично в корпусі 1, керує рухом куль 3	Концентрично в корпусі 1	Концентрично в корпусі 1
4	Породоруйнівні кулі	Породоруйнівні кулі 3 використовуються для обробки периферійної зони	Циркують у внутрішній порожнині; взаємодіють з матрицею 4	Використовуються в обробці периферійної зони	Фіксуються у пазах зубчастої коронки 4
5	Механічний породоруйнівний орган	Спеціальне породоруйнівне кільце 4	Породоруйнівна матриця 4 з пористою структурою	Коронка 4	Зубчаста коронка 4 з пазами 5
6	Привід	Турбінний двигун 6	Гвинтовий двигун 8, обертання через корпус 1, привід його здійснюється промивальною рідиною	Гідроударник 6; включається до роботи перекрыттям клапаном 9 отвору в поршні 10, удар передається через ковадло 7	Пневмоударник 6; удар здійснюється через ковадло 10
7	Колона бурильних труб	Колона бурильних труб 7 передає обертання на корпус 1 і породоруйнівне кільце 4	Передає обертання на корпус 1 і матрицю 4	Передає обертання та тиск на гідроударник 6	Через перевідник 7 передає обертання та стиснене повітря
8	Пориста/захоплююча структура породоруйнівного органу	Породоруйнівне кільце 4 утримує кулі 3	Нижня частина матриці утримує уламки куль 3 і породи	Нижня частина коронки 4 утримує кулі 3	Пази 5 на коронці утримують кулі 3 під час контакту з породним уступом

Табл. 4 дозволяє наочно простежити конструктивні особливості та взаємозв'язки між елементами, що беруть участь у руйнуванні гірської породи, а також оцінити ефективність передачі енергії від приводів різного типу – гвинтового, турбінного, гідро- та пневмоударного. Завдяки такому порівнянню можна визначити, як різні конструктивні рішення впливають на стабільність бурового процесу, інтенсивність ведення робіт, розподіл навантажень між робочими органами та забезпечення охолодження та видалення продуктів руйнування. Крім того, аналіз підкреслює специфіку адаптації окремих деталей під різні типи приводів і методи руйнування, що дає змогу вибирати оптимальні конструктивні рішення залежно від геолого-технічних умов, зокрема міцності порід, кривизни свердловини та наявності поглинань промивної рідини. Такий системний підхід сприяє комплексному розумінню роботи бурових пристроїв і дозволяє оцінити потенційні переваги кожного з них у реальних умовах експлуатації.

На основі проведеного нами порівняльного аналізу розглянутих бурових пристроїв (табл. 4) можна зробити наступні висновки. Кожен з пристроїв гідро(пневмо)механічного буріння – з гвинтовим, турбінним приводом, гідроударником і пневмоударником – демонструє специфічне конструктивне рішення, що активно впливає на ефективність руйнування гірської породи та стабільність бурового процесу. Пристрій з гвинтовим приводом забезпечує рівномірне розподілення навантажень на робочі органи та ефективну обробку периферійної зони вибою завдяки безперервному обертанню куль і самої коронки [15]. Турбінний двигун підвищує інтенсивність обертання корпусу і коронки, що сприяє швидкому руйнуванню породи, самоочищенню каналів і ефективному видаленню продуктів руйнування [14]. Пристрій з гідроударником відзначається високою саморегульованістю: ударні імпульси передаються на кулі та коронку у відповідь на зміну кривизни вибою свердловини, що забезпечує оптимальне осьове навантаження і сколювальний ефект, підвищуючи рейсову швидкість буріння [16]. Пневмоударний пристрій дозволяє вести роботи в умовах обмеженого водопостачання або при поглинанні промивальної рідини, завдяки чому забезпечується безперервність процесу буріння та стабільне калібрування стінок свердловини [17]. Загалом, аналіз показує, що конструктивні особливості кожного з пристроїв – наприклад, розташування зубчастої коронки та пазів для куль, способи передачі енергії від обертального приводу або ударника – безпосередньо визначають механізми взаємодії робочих органів із гірською породою, ефективність передачі енергії, інтенсивність протікання руйнівних процесів та можливість роботи у складних гірничо-геологічних умовах. Застосування різних приводів і методів руйнування дозволяє адаптувати пристрої до конкретних умов свердловини, забезпечуючи при цьому оптимальне поєднання продуктивності, надійності та стійкості процесу поглиблення вибою свердловини.

У попередньому аналізі були детально розглянуті конструктивні особливості та принципи роботи нових пристроїв із різними типами приводів; було також відзначено, що ефективність руйнування гірської породи, стабільність процесу поглиблення вибою та розподіл навантажень значною мірою залежать від точного узгодження роботи окремих деталей і способів передачі енергії. Водночас в сучасних умовах необхідності підвищення продуктивності та безпеки бурових робіт вимагається не лише механічна досконалість пристроїв, але й наявність можливості оперативного контролю та регулювання відповідного процесу. Саме ця необхідність створює підґрунтя для впровадження автоматизованих систем керування, які дозволяють інтегрувати датчики, моніторинг і алгоритмічне управління у роботу бурових механізмів. Автоматизація забезпечує контроль за обертанням, осьовим навантаженням, частотою та силою ударів, а також дозволяє коригувати режим роботи у реальному часі залежно від геолого-технічних умов [18].

Запропоновані гідро(пневмо)механічні пристрої (гідро- та пневмоударні) та механізми з комбінованим кулеструминним руйнуванням вже демонструють автоматичне включення ударного режиму при криволінійній формі вибою або підвищенні навантажень на периферійну

зону; вказане створює базу для інтеграції електронних сенсорів та контролю в реальному часі. Датчики тиску, швидкості обертання та положення куль можна підключати до систем автоматичного регулювання, що дозволить оптимізувати передачу енергії на робочі органи і підтримувати стабільність процесу без постійної участі оператора. Використання автоматизованих систем дозволяє враховувати зміну міцності порід, кривизни стовбура свердловини та поглинання промивальної рідини, оперативно коригуючи режим роботи пристрою (обертання, частоту ударів, інтенсивність подачі циркуляційного середовища). Автоматизація зменшує ризики людського фактору, дозволяє проводити буріння в складних геологічних умовах і підвищує техніко-економічні показники завдяки стабільній роботі пристроїв і мінімізації простоїв (табл. 5).

Таблиця 5. Можливості впровадження автоматизованих систем у пристрої гідро(пневмо)механічного буріння свердловин

Параметри процесу автоматизації та його функціональна ознака	Найменування моделі гідро(пневмо)механічного пристрою			
	Гідромеханічний з турбінним приводним апаратом ГПБ - 1В	Гідромеханічний з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г	Гідромеханічний для буріння з гідроударником ГПБ - 1ГУ	Пневмомеханічний для буріння з пневмоударником ГПБ - 1ПУ
Можливість інтеграції сенсорів	Контроль обертів і осьового навантаження	Контроль моменту і швидкості обертання	Контроль частоти та сили ударів	Контроль тиску та циклів ударів
Регулювання режиму роботи в реальному часі	Підтримка оптимальної швидкості буріння	Плавне коригування подачі	Автоматичне включення/вимикання ударного механізму	Стабілізація ударних імпульсів при зміні умов вибою
Аналіз стану вибою та гірської породи	Вимір кривизни та навантажень	Виявлення перешкод і поглинань	Оцінка інтенсивності руйнування периферії	Виявлення утворення «параболічної» форми вибою
Оптимізація енергоспоживання	Мінімізація втрат при обертанні	Регулювання подачі енергії на кулі	Використання імпульсів тільки при контакті	Економія енергоносія при неповному навантаженні
Потенціал дистанційного управління	Так, через автоматичний привід	Так, із корекцією параметрів	Так, адаптивне керування частотою ударів	Так, можливе дистанційне включення/відключення

Проведений аналіз (табл. 5) свідчить, що застосування автоматизованих систем у бурових пристроях з різними типами приводів є доцільним і перспективним напрямом підвищення ефективності гідро- та пневмомеханічного буріння. Найвищий потенціал автоматизації спостерігається у пристроях, де можлива точна регуляція параметрів тиску, подачі промивної рідини та частоти обертання. Для гвинтових двигунів впровадження елементів автоматизації сприяє стабілізації режимів роботи та контролю навантажень на породоруйнівний інструмент, а для пневмоударних – підвищує надійність і зменшує енерговитрати за рахунок оптимізації циклів ударів і подачі повітря. У цілому впровадження таких систем забезпечує підвищення продуктивності, зменшення аварійності та створює

умови для інтеграції процесу спорудження свердловин різного промислового призначення в сучасні цифрові технології моніторингу й керування.

Виходячи з вищезазначеного, наступним логічним кроком є аналіз натурних показників роботи конкретного пристрою – гідромеханічного бурового пристрою з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г – з одночасною оцінкою можливостей його автоматизації. Наведена табл. 6 містить основні експериментальні параметри роботи, які є ключовими для побудови системи моніторингу й керування в реальному часі. На їхній основі можна визначити набір контролюючих пристроїв і розробити алгоритми корекції режимів з метою підтримки оптимальних параметрів буріння.

Таблиця 6. Деякі показники процесу роботи гідромеханічного пристрою для буріння з гвинтовим приводним двигуном ГПБ - 1Г

Найменування досліджуваних порід	Стан вибою модельної свердловини	Режимні параметри процесу руйнування гірських порід		
		Осьове навантаження на кільце C , Н/мм ²		
		2	3	4
		Частота обертання кільця n , хв ⁻¹		
		225		
		Середнє значення швидкості поглиблення вибою модельної свердловини u , мм/хв		
граніт крупнозернистий	монолітний/деформований	6,11	6,29	6,48
граніт дрібнозернистий	монолітний/деформований	3,75	3,96	4,09

Отримані результати (табл. 6) підтверджують стабільну роботу пристрою ГПБ - 1Г у широкому діапазоні гідравлічних і механічних режимів. Співвідношення між осьовим навантаженням і частотою обертання свідчить про ефективну передачу енергії від гвинтового двигуна до робочого інструмента, що забезпечує високу інтенсивність руйнування породи при збереженні стійкості процесу. Аналіз отриманих показників демонструє також можливість впровадження автоматизованої системи регулювання, здатної в реальному часі коригувати параметри буріння відповідно до умов роботи; такі системи можуть автоматично підтримувати оптимальну витрату промивальної рідини і а також крутний момент на пристрої, запобігати перевантаженням і коливанням частоти обертання, що значно підвищує надійність і ефективність експлуатації. Отже, представлені результати є не лише підтвердженням працездатності гідромеханічного пристрою ГПБ - 1Г, а й базою для створення адаптивних алгоритмів автоматизованого керування, орієнтованих на підвищення продуктивності бурових пристроїв нового покоління.

Висновки

1. Проведене нами аналітичне дослідження технології виконання бурових робіт виявило ключові аспекти застосування сучасних механічних способів руйнування гірського масиву та окреслило їхні сильні й слабкі сторони.

2. Розроблені гідро(пнеumo)механічні пристрої (зокрема ГПБ - 1Г, ГПБ - 1В, ГПБ - 1ГУ, ГПБ - 1ПУ) підтвердили техніко-технологічну доцільність розробки комбінованого ударно-обертального і кулеструминного підходу до руйнування гірського масиву; їх конструктивні особливості забезпечують стабілізацію профілю вибою, інтенсифікацію руйнування периферії та підвищення рейсової швидкості при зниженні зношування і простоїв у складних гірничо-геологічних умовах.

3. Результати досліджень свідчать про реальний потенціал впровадження адаптивних систем автоматизації в гідромеханічне буріння, що дозволить створити надійні алгоритми керування режимами обертання та формування ударних імпульсів у реальному часі, унаслідок чого мінімізуватимуться перевантаження й простої та підвищиться надійність експлуатації відповідних пристроїв.

4. Подальші аналітичні та лабораторно-стендові дослідження основних параметрів гідромеханічного буріння мають бути спрямовані на систематичне вивчення і оптимізацію техніко-технологічних схем супроводу процесу, з акцентом на адаптивність до геолого-технічних умов конкретної свердловини; вказане передбачає комплексну програму робіт, що включає ідентифікацію чутливих параметрів (енергії удару, швидкості подачі, характеристик робочого середовища), їх лабораторне моделювання в реалістичних умовах та чисельну оптимізацію режимів, результатом чого повинен стати набір адаптивних технологічних схем та критеріїв вибору режимів, які забезпечують ефективність руйнування порід.

A.O. Ihnatov

Dnipro Polytechnic National Technical University

DESIGN AND TECHNOLOGICAL COMPONENTS OF HYDROMECHANICAL DRILLING AND POSSIBILITIES FOR ITS AUTOMATED CONTROL

The article substantiates the rational design and technological parameters of modernized hydro-mechanical drilling tools. This is based on the established patterns of the interaction process between moving solid spheres and the rock mass in the bottom-hole zone of the well, which enhances well drilling efficiency.

The limitations of traditional jet-ballistic and mechanical drilling methods in challenging mining and geological conditions are established. The expediency of transitioning to hydro-mechanical rock destruction schemes, which combine mechanical and hydrodynamic (pneumodynamic) impacts, is justified. Fundamental design elements for new devices are proposed. The advantages of combined rock fragmentation schemes, where the working agents act in a coordinated manner, are demonstrated. It is shown that the coordination of the percussive and rotational components enhances the spalling effect at the "sphere-rock" interface while maintaining acceptable operational loads. The necessity of implementing self-regulating systems for the operating modes of hydro-mechanical devices is justified.

An approach is proposed whereby the parameters of impact and rotation are adapted based on the shape of the bottom hole, its curvature, and the actual resistance of the rock, thereby increasing process stability and reducing the risk of failure incidents. It is demonstrated that the implementation of real-time adaptive control systems enables the development of reliable algorithms for managing rotation regimes and generating impact impulses.

A concept for hydro-mechanical drilling with adaptive control of energy parameters is proposed. Fundamental designs for combined devices with autonomous drives have been developed, incorporating a self-regulating mechanism for impact load generation and rotation based on the bottom-hole shape and rock resistance. Furthermore, the criteria for optimizing the interaction in the "sphere-rock" system and the principles of real-time adaptive control algorithms have been defined.

Key words: *hydromechanical drilling, well, bottom-hole, technological process, rock formation, self-regulation mechanism, device design, rock-breaking ball, deformation, energy parameters.*

Література

1. Lopez, J. C., Lopez, J. E., & Javier, F. Drilling and blasting of rocks. CRC Press Taylor & Francis, 2017. 408 p.
2. Vaddadi, N. Introduction to oil well drilling. Bathos (U Vee Infosystems), 2015. 204 p.
3. 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.

4. Hossain, M.E., Islam, M.R. Drilling engineering: problems and solutions. Wiley – Scrivener publishing, 2018. 627 p.
5. Ihnatov, A., Koroviaka, Y., Rastsvietaiev, V. & Tokar, L. Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020*, E3S Web of Conferences. 2021. 2021230, 01016.
6. Ігнатів А.О., Пащенко О.А., Коров'яка Є.А., Семехін В.Ю., Логвиненко О.О., Аскеров І.К. Деякі пояснення ударного механізму впливу на гірські породи при бурінні свердловин. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2021. Вип. 3(66). С. 177–192.
7. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15, N 3. P. 122–129.
8. Ihnatov A O., Koroviaka Ye.A., Pavlychenko A.V., Rastsvietaiev V.O., Askerov I.K. Determining key features of the operation of percussion downhole drilling machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Proceeding of the 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023) 22/05/2023 – 26/05/2023 Kryvyi Rih. 2023. Vol. 1254. 012053.*
9. Ihnatov, A., Haddad, J.S., Koroviaka, Ye.A., Aziukovskyi, O., Rastsvietaiev, V., Dmytruk, O. Study of rational regime and technological parameters of the hydromechanical drilling method. *Archives of Mining Sciences*. 2023. N 2. P. 285 – 299.
10. Aziukovskyi O.O., Koroviaka Ye.A., Ihnatov A.O. Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions. Dnipro: Zhurfond, 2023. 159 p.
11. Lyes, B. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation (Springer Series in Advanced Manufacturing). Springer, 2020. 250 p.
12. Gatlin, C. Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.J., 1960. 341 p.
13. Павличенко А.В., Ігнатів, А.О., Коров'яка Є.А., Барташевський С.Є., Коротка І.Ю., Мекшун М.Р. Основи організації системи гідравлічного очищення свердловин. *Збірник наукових праць НГУ*. 2021. Вип. 67 С. 136–152.
14. Кулеструмний пристрій для буріння свердловин пат. 102707. Україна: МПК E21B7/18; опубл 12.08.2013. Бюл. № 15.
15. Кулеструмний пристрій для буріння свердловин пат. 102708. Україна: МПК E21B7/18; опубл 12.08.2013. Бюл. № 15.
16. Пристрій для буріння пат. 109273. Україна: МПК E21B7/18; опубл 10.08.2015. Бюл. № 15.
17. Пристрій для буріння пат. 109274. Україна: МПК E21B7/18; опубл 10.08.2015. Бюл. № 15.
18. Когутяк М.І, Р.М. Лещій, М.М. Дранчук, М.В. Шавранський. Автоматизація неперервних технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості: Навчальний посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2015. 286 с.

Надійшла 11.11.25

References

1. Lopez, J. C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis.
2. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos (U Vee Infosystems).
3. 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 – Scientific Bulletin of the National Mining University*, (1), 20–27.

4. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Scrivener publishing.
5. Ihnatov, A., Koroviaka, Y., Rastsvietaiev, V. & Tokar, L. (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
6. Ihnatov, A., Pashchenko, O., Koroviaka Ye., et al. (2021). Deiaki poiasnennia udarnoho mekhanizmu vplyvu na hirski porody pry burinni sverdlovyh [Some explanations of the impact mechanism on rocks when drilling wells]. *Collection of research papers of the NMU, 3(66)*, 177–192 [in Ukrainian].
7. Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits, 15(3)*, 122–129.
8. Ihnatov A O., Koroviaka Ye.A., Pavlychenko A.V., et al. (2023). Determining key features of the operation of percussion downhole drilling machines. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 1254*, 012053.
9. Ihnatov, A., Haddad, J.S., Koroviaka, Ye.A., et al. (2023). Study of rational regime and technological parameters of the hydromechanical drilling method. *Archives of Mining Sciences, (2)*, 285–299.
10. Aziukovskyi O.O., Koroviaka Ye.A., Ihnatov A.O. (2023). *Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions*. Zhurfond.
11. Lyes, B. (2020). *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*. Springer Series in Advanced Manufacturing.
12. Gatlin, C. (1960). *Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions*. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.J.
13. Pavlychenko A., Ihnatov, A., Koroviaka Ye., et al. (2021). Osnovy orhanizatsii systemy hidravlichnoho ochyshchennia sverdlovyh [Fundamentals of organizing a hydraulic well cleaning system]. *Collection of research papers of the NMU, 4(67)*, 136–152 [in Ukrainian].
14. Ihnatov A.O., Viatkin S.S. (2013) *Patent of Ukraine № 102707. МПК E21B7/18. Kulestrumynnyi prystrii dlia burinnia sverdlovyh [Impact drill for well drilling]*. (Patent Ukraine № 102707) [in Ukrainian].
15. Ihnatov A.O., Viatkin S.S. (2013) *Patent of Ukraine № 102708. МПК E21B7/18. Kulestrumynnyi prystrii dlia burinnia sverdlovyh [Impact drill for well drilling]*. (Patent Ukraine № 102708) [in Ukrainian].
16. Ihnatov A.O. (2015) *Patent of Ukraine № 109273. МПК E21B7/18. Prystrii dlia burinnia [Drilling device]*. (Patent Ukraine № 109273) [in Ukrainian].
17. Ihnatov A.O. (2015) *Patent of Ukraine № 109274. МПК E21B7/18. Prystrii dlia burinnia [Drilling device]*. (Patent Ukraine № 109274) [in Ukrainian].
18. Kohutiak M.I, R.M. Leshchii, M.M. Dranchuk, M.V. Shavranskyi. (2015). *Avtomatyzatsiia neperervnykh tekhnolohichnykh protsesiv v naftovii ta hazovii promyslovosti [Automation of continuous technological processes in the oil and gas industry]*. Fakel [in Ukrainian].