

8. Dreus, A., Lysenko, K., Kozhevnykov, A., & Liu, B. (2017). Modeling hydrodynamics of the flushing fluid intermittent flow in the hydraulic system of the diamond bit. *Mining of Mineral Deposits*, 11(2), 84–90.
9. Roach, J. A. (2025). International Law Context and Interface of MARPOL with Other Regimes. *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (pp. 67–81). Edward Elgar Publishing.
10. Kuru, A., Parkinson, T., Brambilla, A., Gasparri, E., & Astell-Burt, T. (2025). Scoping Ecological Influences of the Built Environment: Developing the Biodiversity Lifecycle Impact Assessment for Buildings (BLIAB) Framework. *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 1412–1423). Springer Nature Singapore.

УДК 622.243.92

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-88-102

А.О. Ігнатов, канд. техн. наук, **І.К. Аскеров**

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРОУДАРНИКІВ ДЛЯ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Стаття присвячена науково обґрунтованому аналізу та порівнянню нових моделей гідроударників різних типів з метою виявлення закономірностей їх послідовного удосконалення, визначення конструктивних переваг і недоліків, а також встановлення зв'язку між будовою основних вузлів та енергетичними параметрами процесу формування ударних імпульсів.

Встановлено основні закономірності розвитку конструкцій гідроударників та їх взаємозв'язок із принципом роботи. Визначено, що всі досліджені типи гідроударних машин – пружинно-гідролінійний, пневмогідролінійний і вакуумкамерний – зберігають подібну архітектуру корпусу, але відрізняються характером внутрішньої взаємодії вузлів і способом формування робочих камер. Виявлено, що ускладнення конструкції забезпечує точніше регулювання параметрів процесу формування ударного імпульсу, проте знижує ремонтпридатність і підвищує вимоги до точності виготовлення. Простежено тенденцію переходу від простих систем стабілізації удару до більш гнучких схем із керованими режимами роботи. Узагальнення результатів дозволило сформулювати основні напрямки вдосконалення гідроударників: спрощення конструкції при збереженні стабільності роботи, зменшення кількості швидкозношуваних елементів і підвищення технологічної адаптивності пристроїв для різних умов буріння.

Систематизовано конструктивні принципи побудови гідроударників різних типів та визначено взаємозв'язок між їхньою структурою і характером формування ними ударних імпульсів; вперше здійснено порівняльний аналіз пружинно-гідролінійної, пневмогідролінійної та вакуумкамерної схем, що дало змогу визначити закономірності розвитку конструкцій і сформулювати напрями їх подальшого вдосконалення.

Ключові слова: *гідроударник, буріння свердловин, конструкція, бойок, ковадло, ударний імпульс, гідролінійна система, порівняльний аналіз, енергоефективність.*

Постановка проблеми

До головних тенденцій сучасного етапу розвитку техніки і технології буріння свердловин, згідно з проведеним аналітичним оглядом, можна віднести необхідність

підвищення ефективності процесу руйнування гірських порід без одночасного збільшення енергоспоживання та втрат ресурсу обладнання [1]. Особливо актуальним це питання стає під час спорудження свердловин у складних геолого-технічних умовах, коли традиційні бурові інструменти та бурові агрегати не забезпечують достатньої швидкості проходки й стабільності роботи. У таких умовах застосування гідроударників є одним із найбільш результативних напрямів підвищення продуктивності буріння, оскільки вони поєднують ударний і обертальний вплив на вибій, інтенсифікуючи процес руйнування гірської породи [2].

Проте, попри значний розвиток теорії та практики гідроударного буріння, існуючі конструкції гідроударників мають низку технічних обмежень. Серед них варто виділити надмірну складність внутрішньої компоновки, підвищений гідравлічний опір циркуляційних каналів, залежність енергетичних параметрів від властивостей промивальної рідини, а також відсутність гнучкого регулювання сили й частоти ударів. Названі чинники знижують ефективність перетворення енергії потоку в механічну роботу та обмежують можливості адаптації пристрою до конкретних умов буріння свердловин [3].

Окрім того, під час експлуатації таких ударних машин спостерігається підвищене зношування пружинних і клапанних елементів, що значно скорочує строк служби гідроударників та ускладнює їх технічне обслуговування. Додатковою проблемою є відсутність системи динамічної стабілізації тиску в камерах, що призводить до нестійкості режиму роботи, особливо за умов коливань подачі бурового насоса.

Отже, науково-технічна проблема полягає у пошуку прийнятних шляхів удосконалення конструкцій гідроударників, які забезпечують: стабільне формування ударних імпульсів незалежно від властивостей промивальної рідини; зниження інерційності руху бойка та рівня навантажень на конструктивні елементи; можливість регулювання енергії одиничного удару в режимі реального часу; спрощення конструкції при збереженні високих експлуатаційних характеристик [4].

Адекватне розв'язання сформульованої проблеми передбачає побудову нових технічних концепцій гідроударників, у яких оптимізовано кінематичну схему, структуру гідравлічних камер та умови взаємодії робочих вузлів для досягнення максимальної енергоефективності, довговічності й технологічної гнучкості процесу поглиблення свердловин різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розвиток конструювання гідроударних пристроїв для буріння свердловин характеризується інтенсивним пошуком шляхів підвищення енергоефективності, стабільності та довговічності роботи основних вузлів [5]. У науково-технічних джерелах зростає увага до проблеми ефективного перетворення енергії потоку промивальної рідини в механічну роботу удару, мінімізації втрат у циркуляційних каналах і підвищення точності регулювання енергетичних параметрів циклу формування ударного імпульсу.

Багато досліджень спрямовано на ґрунтовний аналіз гідродинамічних процесів та явищ, що відбуваються у внутрішніх камерах гідроударника; зокрема, вивчається вплив перепаду тиску, площі дії, форми каналів і об'єму камер на швидкість руху бойка та амплітуду удару [6]. Особлива увага приділяється створенню аналітичних та числових моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку системи при різних режимах буріння. Такі моделі стають основою для підбору оптимальних геометричних параметрів і визначення межі енергетичної ефективності конструкції конкретної гідроударної машини [7].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із зменшенням інерційності рухомих елементів і підвищенням стабільності циклу при коливаннях тиску в гідравлічній системі; пропонуються до застосування конструкції пружинних демпферів, газонаповнених і вакуумних камер, які дозволяють згладжувати пікові навантаження та забезпечувати більш

плавний хід бойка. Реалізація цих рішень дозволяє зменшити вібрації, динамічні удари у з'єднаннях і знос деталей, що працюють у циклічному режимі [8].

Увагу приділяють також матеріалознавчим аспектам. Використання зносостійких сплавів, твердих покриттів та гумометалевих ущільнювачів сприяє істотному збільшенню ресурсу роботи гідроударних пристроїв і зниженню витрат на технічне обслуговування. Нові підходи до виготовлення корпусних частин дозволяють зменшити масу пристрою, не втрачаючи міцності, що позитивно впливає на енергетичний баланс системи.

У низці проаналізованих публікацій розглядається питання регулювання енергії одиничного удару шляхом зміни перепаду тиску, ходу поршня або маси бойка [9]. Розробляються системи керування, здатні забезпечити оперативний перехід між ударно-обертальним і обертально-ударним режимами роботи, що особливо важливо при змінних геолого-технічних умовах, характерних для більшості свердловин.

Водночас у сучасних дослідженнях виявлено певні невирішені проблеми – відсутність уніфікованих методик розрахунку енергії удару для різних типів гідроударників, недостатню кількість експериментальних даних про вплив реологічних властивостей промивальної рідини на стабільність циклу, а також складність інтеграції моделей у системи керування буровим процесом.

Отже, проведений нами аналіз наукових публікацій показує, що подальший прогрес у галузі гідроударного буріння пов'язаний із комплексним удосконаленням конструкції, матеріалів і гідродинаміки пристрою, а також із переходом до адаптивних систем регулювання, здатних підтримувати стабільну енергію удару за змінних умов експлуатації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Попри істотний прогрес у вирішенні найважливіших теоретичних і практичних питань удосконалення вибійних гідроударних машин для буріння свердловин різного призначення (не виключено їх застосування і в інших свердловинних операціях), ряд ключових аспектів все ще залишається недостатньо розробленим і потребує свого подальшого науково-технічного опрацювання. Більшість досліджень зосереджено на окремих елементах конструкції або гідравлічних процесах, тоді як комплексний підхід до аналізу енергетичного циклу гідроударника має істотні прогалини, а це створює відомі труднощі при узгодженні розрахункових, експериментальних і практичних результатів [8].

Однією з головних невирішених частин проблеми є відсутність уніфікованої методики розрахунку енергії одиничного удару для гідроударників різних типів; існуючі моделі доволі часто базуються на спрощених припущеннях і не в достатній мірі враховують вплив нестационарних процесів, зокрема, явищ кавітації, в'язкості промивальної рідини чи коливань тиску в системі, що значно обмежує можливість точного прогнозування енергетичної ефективності та вибору оптимальних параметрів роботи конкретного гідроударного пристрою [9].

Недостатньо дослідженим залишається також вплив геометрії каналів і камер на стабільність режиму роботи гідроударних пристроїв. Форми проточних частин, кути підведення потоку, радіуси заокруглення та конфігурації дросельних отворів визначають рівень втрат тиску, але системного аналізу цих чинників у літературі майже немає. Аналогічно, динамічна взаємодія бойка і ковадла потребує свого уточнення – зокрема, щодо розподілу виникаючих в системі напружень, тривалості контакту та умов передачі імпульсу при різних швидкостях і тисках.

Окремо потребує вирішення проблема адаптивного керування енергетичними параметрами удару. Існуючі конструкції гідроударних пристроїв не мають достатньої гнучкості для активної зміни амплітуди та частоти ударів у режимі реального часу, що істотно знижує ефективність роботи гідроударника при переході між гірськими породами різної твердості або при коливаннях подачі бурового насоса. Перспективним напрямом є створення систем, здатних автоматично регулювати параметри удару залежно від умов буріння. Саме розробці таких адаптивних систем і присвячене це дослідження.

Важливим невирішеним питанням залишається також збереження довговічності ущільнювальних і пружинних елементів; їхня робота в умовах високого тиску, температури та наявності абразивних частинок призводить до прискореного зносу, що зменшує загальний ресурс пристрою.

Підсумовуючи, можна виділити такі основні невирішені напрями: створення єдиної аналітичної бази для розрахунку параметрів удару з урахуванням гідродинамічних і механічних чинників; розроблення моделей взаємодії елементів «бойок - ковадло» з урахуванням динамічних ефектів; підвищення ресурсу деталей та ущільнювачів за рахунок нових матеріалів і конструктивних форм; створення адаптивних систем керування енергетичними режимами гідроударників у процесі буріння свердловин.

Вирішення цих питань, зокрема розробка адаптивної системи керування, є метою даного дослідження і ляже в основу нового покоління гідроударних пристроїв, які поєднують високу енергоефективність, стабільність та довговічність у широкому спектрі геолого-технічних умов.

Мета статті полягає в науково обґрунтованому аналізі та порівнянні нових конструкцій гідроударників різних типів з ціллю виявлення закономірностей їх послідовного удосконалення, визначення конструктивних переваг і недоліків, а також встановлення зв'язку між будовою основних вузлів та енергетичними параметрами процесу формування ударних імпульсів.

Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики

Методика дослідження базувалася на структурно-функціональному аналізі відомих технічних рішень і порівняльному вивченні їх конструктивних особливостей [10]. Роботу проводили у кілька етапів: систематизація джерел і технічних описів гідроударників; побудова узагальнених схем; визначення складу основних вузлів і способів їх взаємодії.

Особливу увагу приділено просторовій компоновці корпусу, розташуванню камер, конфігурації каналів та типу кінематичного зв'язку між бойком і ковадлом. Порівняння здійснювалося за геометричними, функціональними та технологічними критеріями; гідроударники розглядалися як системи, у яких взаємодія рухомих і нерухомих елементів формує послідовність фаз ударного циклу. Порівняння запропонованих конструкцій – пружинно-гідролінійної, пневмогідролінійної та вакуумкамерної – дало змогу визначити спільні конструктивні принципи, характерні відмінності та тенденції розвитку. Застосована методика дозволила узагальнити отримані результати у вигляді системного опису будови й принципу дії гідроударників, що створює основу для подальшого проектування й удосконалення таких пристроїв.

Виклад основного матеріалу дослідження

Науково-технічний прогрес в такій важливій галузі як буріння свердловин різного призначення безпосередньо пов'язаний із вдосконаленням вибійного породоруйнівного інструменту та відповідних бурових механізмів, що забезпечують підвищення ефективності процесу руйнування гірських порід [11]. Причому одним із найрезультативніших напрямів в означених обставинах є застосування гідроударників (спеціальних вибійних бурових машин), які перетворюють енергію потоку циркулюючої промивальної рідини в імпульси механічних ударів по породоруйнівному інструменту, поєднуючи при цьому переваги гідравлічних і механічних принципів дії на породний вибій споруджуваної свердловини [3]. Ключовим фактором ефективності вибійних машин є конструктивні рішення, що визначають узгодженість роботи окремих деталей і виконавчих вузлів пристроїв для генерування ударних навантажень (імпульсів) [4].

У процесі розвитку конструкцій гідроударників було створено низку різноманітних технічних варіантів – від класичних схем з пружинами та клапанами до складних гідравлічних систем з плунжерами й гідророзподільниками. Кожне інженерне рішення, закономірно, було спрямоване на зменшення енергетичних втрат, стабілізацію режимів роботи, підвищення

довговічності та розширення області ефективного застосування, проте різні покоління гідроударників мають свої недоліки – інерційність окремих рухомих елементів, залежність від властивостей промивальної рідини, складність виготовлення та обслуговування, а також обмеженість режимів буріння. Саме тому виникає об'єктивна необхідність проведення порівняльного аналізу типових конструкцій гідроударників (табл. 1), який дозволяє: визначити динаміку змін в гідроударних пристроях та простежити, як змінювалися їх функціональні можливості; оцінити вплив окремих конструктивних рішень (клапанні схеми, системи плунжерів, пружинні вузли) на енергетичну ефективність і стабільність формування ударних імпульсів; встановити придатність кожної конструкції до конкретних геологічних і технологічних умов буріння; виявити вузли, що зумовлюють зниження надійності або підвищення енергетичних витрат; визначити напрямки подальшого вдосконалення гідроударників з урахуванням сучасних вимог бурової техніки і технології спорудження свердловин різних промислових груп. Слід зазначити, що порівняльний аналіз не лише систематизує відомі технічні рішення, але й слугує базою для обґрунтування нових, більш досконалих конструкцій, орієнтованих на підвищення ефективності технології буріння, зниження витрат енергії та розширення діапазону робочих режимів. [5].

Таблиця 1. Відомості про характеристичні ознаки пристроїв для гідроударного буріння свердловин

Характеристичні ознаки конструкції і принципу дії гідроударників	Умовне позначення типу конструкції гідроударників		
	А	Б	В
Окремі складові виконавчого механізму	корпус, поршень-бойок, ковадло, клапан, пружина бойка, пружина клапана, сполучні канали	корпус, клапан, осьові і радіальні канали, поршень-бойок, пружини, ковадло, перехідник	корпус, бойок, система плунжерів, гідророзподільники, ковадло, сполучні канали
Принцип дії	передача енергії вибійному інструменту: поршень-бойок → ковадло → породоруйнівний інструмент	потік промивальної рідини діє безпосередньо на бойок через клапанну систему	енергія промивальної рідини через систему плунжерів і розподільників керує рухом бойка, який передає удари на вибійний інструмент

Основні недоліки	інерційність бойка і клапана; відсутність регулювання енергії удару; залежність режиму від в'язкості та густини промивальної рідини і як результат зниження ефективності ударно-обертального буріння; складність конструкції та взаємодії вузлів; велика кількість деталей; неможливість швидкої зміни режимів буріння	складний ланцюг взаємодії системи «клапан - бойок»; відсутність технологічно узгодженого діапазону швидкостей бойка; неможливість стабільного обертально-ударного режиму; зниження енергоемності удару; надлишок швидкозношуваних деталей; складність виготовлення і монтажу; недосконалість клапанної системи розподілу енергоносія; великі знакозмінні навантаження на силові пружини (їх прискорений знос)	надмірна конструктивна складність; залежність енергії ударів від властивостей рідини; велика інерційність руху бойка; можливість роботи лише у режимі обертально-ударного буріння; обмежена сфера застосування (переважно з алмазним інструментом); складність виготовлення і збирання; велика кількість деталей; багатофакторність циклу та, як слідство, некоректна взаємодія вузлів; зношуваність пружинних елементів; високі енергетичні витрати при роботі
------------------	--	---	---

Дані, представлені в табл. 1, дають змогу не лише якісно оцінити послідовність розвитку базових моделей ударних пристроїв, але й простежити закономірності трансформації конструктивних рішень, виявити сильні та слабкі сторони пристроїв, а також окреслити напрями їх подальшого ефективного вдосконалення. Узагальнюючи результати проведеного нами порівняльного аналізу, можна визначити основні тенденції та напрямки їх подальшого вдосконалення, а саме: зі зростанням технічної складності кожного пристрою збільшується точність регулювання робочого процесу в ударній машині, але погіршується ремонтпридатність; раціональним напрямом подальшого вдосконалення є створення спрощених схем із регульованою енергоемністю ударів, стабільною роботою при коливаннях тиску та мінімальною кількістю швидкозношуваних деталей; жодна з проаналізованих нами конструкцій повністю не задовольняє сучасні вимоги до енергоефективності, але їх вивчення формує основу для проектування нових типів гідроударників з комбінованим гідромеханічним керуванням.

Подальший сталий розвиток гідроударних пристроїв неодмінно базується на впровадженні нових інженерних підходів, спрямованих на підвищення енергоефективності, надійності та функціональної широти роботи в різних геолого-технічних умовах буріння [8]. Для оцінки напрямів такого вдосконалення доцільно здійснити порівняльний аналіз запропонованих нами концепцій нових конструкцій (табл. 2), які значно відрізняються як за техніко-технологічними особливостями, так і за функціональними можливостями. Представлена в табл. 2 інформація є узагальненням основних ідейних принципів, технічних рішень, очікуваних результатів та сфери застосування кожної з концепцій (ПГБ - 1П – пристрій для гідроударного буріння пружинно-гідралічного типу, ПГБ - 2ПГ – гідроударник пневмогідралічного типу, ПГБ - 3В – гідроударник вакуумкамерний); метою проведеного нами узагальнення є виявлення взаємозв'язку між інженерними змінами й практичним ефектом, що досягається під час експлуатації гідроударників. Цей підхід дозволяє не лише систематизувати існуючі розробки, а й визначити пріоритетні напрями подальшої модернізації ударних механізмів.

Таблиця 2. Результати порівняльного аналізу нових конструкцій пристроїв для гідроударного буріння свердловин

Модель конструкції	Ключова ідея удосконалення	Основні характеристики пропонованого технічного рішення	Очікувані практичні результати	Можливе розширення області застосування
ПГБ - 1П	Рационалізація циркуляційних процесів та узгодження фаз формування удару з гідравлічним циклом бурового насоса	Інше конструктивне виконання робочих органів; гнучкість взаємодії бойка, клапана, ковадла; виключення швидкозношуваних деталей; спрощення загальної схеми	Підвищення стабільності та керованості формування ударних імпульсів; незалежність від властивостей промивальної рідини; збільшення швидкості буріння, зменшення амортизації	Використання з твердосплавним та алмазним інструментом; ліквідація аварій та ускладнень у свердловинах
ПГБ - 2ПГ	Використання перепадів тиску як корисного фактора для створення імпульсів	Введення нових елементів зв'язку між вузлами; виключення швидкозношуваних компонентів; реалізація ударно-обертального та обертально-ударного способів буріння; параметрична узгодженість імпульсів	Зменшення витрат гідравлічної потужності; підвищення ефективності взаємодії вузлів; прогнозованість енергетичних параметрів; зростання ресурсу вузлів	Використання у свердловинах різного призначення; роботи з ліквідації ускладнень і аварій
ПГБ - 3В	Керування енергетичними параметрами й оперативний перехід між режимами буріння	Введення нових керованих елементів; узгоджена технологічна взаємодія вузлів; регулювання амплітуди ударних імпульсів; спрощення при підвищенні експлуатаційних характеристик	Керованість енергією удару; оперативна зміна режиму буріння; ефективніше використання гідро- і механічної потужності; підвищення механічної та рейсової швидкостей буріння	Застосування у колонковому (твердосплавному й алмазному) та безкеровому бурінні; використання в аварійних операціях; інтеграція у сучасні компоновки вибійних снарядів

Порівняння розглянутих моделей занурювальних машин (ПГБ - 1П, ПГБ - 2ПГ, ПГБ - 3В) свідчить про послідовну еволюцію технічних ідей у напрямі підвищення ефективності перетворення гідравлічної енергії в ударну дію на вибій споруджуваної свердловини. Всі розглянуті нами моделі мають спільну мету – усунути найбільш очевидні недоліки попередніх

конструкцій (умовного позначення А, Б, В – див. табл. 1), однак досягають цього різними шляхами: від удосконалення внутрішніх циркуляційних процесів до впровадження керованих систем регулювання енергії удару.

Конструкція пристрою для гідроударного буріння пружинного типу ПГБ - 1П зорієнтована на стабілізацію процесу формування удару; її технічна сутність полягає в гармонізації фаз роботи основних вузлів із гідравлічним циклом бурового насоса (поршневого або плунжерного); за рахунок вказаного досягається незалежність дії пристрою від фізико-хімічних властивостей промивальної рідини, усувається ризик гідродинамічних коливань і втрат енергії; результатом є підвищення стабільності процесу буріння та зменшення зносу деталей, що важливо для подовження тривалості рейсу буріння [12].

Конструкція гідроударника пневмогідравлічного типу ПГБ - 2ПГ реалізує ідею раціоналізації енергетичного обміну між робочими вузлами; вона ефективно використовує перепади тиску як корисний енергетичний ресурс, що дозволяє створювати ударні імпульси з меншими втратами потужності. Відмова від швидкозношуваних елементів і застосування параметрично узгоджених механізмів призводить до істотного зростання ресурсу, зменшення гідравлічних втрат і загального підвищення продуктивності буріння. Пристрій набуває більшої технологічної варіативності – може працювати в режимах як ударно-обертального, так і обертально-ударного буріння [13].

Конструкція вакуумкамерного гідроударника ПГБ - 3В є наступним етапом – переходом від інерційної стабілізації до активного керування енергетичними режимами вибійної машини. Введення нових конструктивних елементів і вдосконалення взаємодії між ними забезпечують можливість оперативного регулювання енергії удару та амплітуди імпульсів. Така система дозволяє адаптувати роботу пристрою до геолого-технічних умов у реальному часі; завдяки вказаному підвищується ефективність використання гідравлічної й механічної потужності бурових насосів, зменшується втомне навантаження на елементи бурильної колони, а сам гідроударник стає придатним до інтеграції в сучасні компоновки вибійних бурових снарядів [14].

Послідовність удосконалень демонструє повністю закономірний перехід від конструктивної простоти з обмеженим керуванням до адаптивних, енергорационалізованих гідромеханічних систем [1]. Ключовою тенденцією тут є інтелектуалізація процесу формування ударних імпульсів при одночасному спрощенні конструктивної бази – мінімізація кількості виконавчих вузлів, зменшення зносу та підвищення ресурсу; в результаті вказаного створюється передумова для розроблення нових поколінь гідроударників із гнучким регулюванням енергетичних параметрів, розширеною областю застосування та стабільною роботою в різних технологічних схемах буріння.

Позначимо, що в процесі вдосконалення бурового обладнання [15], в даному випадку вибійних двигунів, важливо не лише аналізувати відмінності між різними типами гідроударників, а й виявляти їх спільні конструктивні риси, узагальнення яких дозволяє визначити базові принципи побудови таких пристроїв, простежити логіку технічного розвитку та встановити структурні елементи, без яких гідроударний механізм не може ефективно функціонувати.

Розгляд спільних характеристик є необхідним для формування єдиної методологічної основи проектування, яка забезпечує сумісність вузлів, взаємозамінність деталей і передбачуваність роботи пристроїв для буріння під час модернізації або розроблення нових моделей. Такий підхід створює основу для оптимізації конструкцій, стандартизації елементів і підвищення технологічної надійності бурових агрегатів у цілому. Наведені нами положення показують доцільність подальшого узагальнення основних інженерних підходів, реалізованих в сучасних розробках гідроударників; у табл. 3 подано суттєві ознаки пропонованих нами нових технічних рішень, які відображають тенденції вдосконалення гідроударників для буріння свердловин.

Таблиця 3. Принципові конструктивні ознаки нових технічних рішень для гідроударного буріння свердловин

№	Принципова ознака	Ключовий характеристичний опис
1	Порядок з'єднання корпусу	Усі конструкції мають багатоланковий корпус, що складається з верхнього перехідника, корпусної втулки або гільзи, стакану (або корпусу), з'єднаних різьбами
2	Наявність циркуляційних каналів	Кожна схема містить систему вертикальних і горизонтальних каналів для проходження промивальної рідини
3	Пари «бойок - ковадло»	В усіх варіантах наявні два основні елементи: поршень-бойок (ударний орган) і ковадло (опорний елемент)
4	Система ущільнень	Присутні кільцеві гумові або гумометалеві ущільнюючі елементи в місцях переміщення рухомих частин
5	Розгінна й ударна камери	Кожна конструкція містить щонайменше дві основні робочі порожнини: розгінну (для прискорення бойка) і ударну (зона контакту з ковадлом)
6	Різьбові з'єднання для монтажу	Всі корпусні частини сполучаються різьбовими парами; також є різьба для під'єднання до бурильної колони та інструменту
7	Наявність ковадла з каналом	У всіх схемах ковадло має вертикальний або центральний циркуляційний канал, який забезпечує прохід промивальної рідини до вибою споруджуваної свердловини

Узагальнення спільних характеристик (табл. 3) переконливо показує, що всі розглянуті конструкції побудовані за єдиною модульною логікою, притаманною більшості сучасних гідроударних пристроїв. Незалежно від покоління або рівня складності, вони зберігають сталу архітектуру корпусу з багатосекційною будовою, яка забезпечує міцність, герметичність і можливість обслуговування; це свідчить про послідовність базових конструкторських принципів, які довели свою ефективність на практиці.

Наявність розвиненої системи циркуляційних каналів і камер різного призначення підтверджує, що ударний пристрій завжди функціонує як замкнута гідравлічна структура, у якій важливо забезпечити баланс між тиском, витратою та герметичністю з'єднань. Повторюваність вузлів «бойок - ковадло» та обов'язкова присутність ущільнювальних елементів вказують на те, що основні кінематичні й гідравлічні функції залишаються незмінними при всіх модифікаціях. Також простежується тенденція до використання уніфікованих з'єднань, що значно спрощує складання, заміну частин і сумісність з іншими компонентами бурового інструменту; вказане яскраво підкреслює прагнення конструкторів до граничної стандартизації елементів, яка забезпечує технологічну надійність і ремонтпридатність системи.

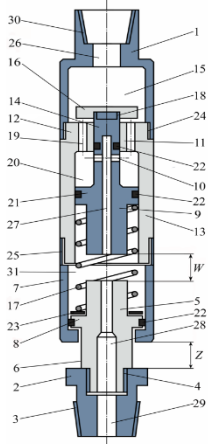
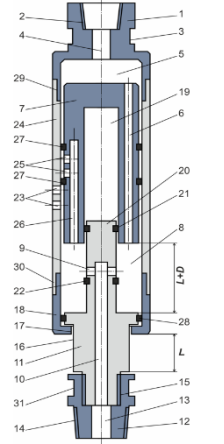
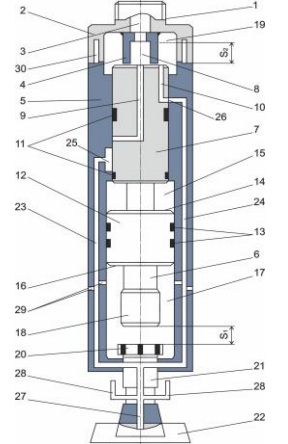
Узагальнено можна стверджувати наступне: наявність певних спільних ознак для вибійних бурових машин свідчить про те, що розвиток гідроударників відбувається не шляхом повного переосмислення конструкції, а через поступове вдосконалення сталих функціональних вузлів, які формують основу будь-якого ефективного ударного механізму для буріння свердловин.

Необхідність аналізу відмінних конструктивних ознак гідроударників має не менш важливе значення, ніж визначення спільних рис, оскільки саме відмінності дозволяють відобразити технічну еволюцію, інженерні пошуки та інноваційні підходи до підвищення ефективності роботи розглядуваних машин. Кожна зміна в компоновці, конструкційних матеріалах або конфігурації робочих вузлів виникає як закономірна відповідь на конкретні

технологічні проблеми – знос деталей, нестабільність циркуляційних процесів, обмеження у швидкості або енергоємності удару.

Розгляд відмінностей (табл. 4) дозволяє виявити, які конструктивні рішення є результативними, а які – надлишковими або малоефективними; це створює основу для подальшої оптимізації технічних схем, вибору раціональних варіантів компоновки та розроблення нових конструкцій із поліпшеними експлуатаційними властивостями. Аналіз відмінних ознак забезпечує науково обґрунтований підхід до вдосконалення гідроударників, спрямований на досягнення максимальної надійності, довговічності та енергетичної ефективності при бурінні свердловин різного призначення.

Таблиця 4. Співставлення принципів конструктивних ознак нових пристроїв для гідроударного буріння свердловин

№	Конструктивна або функціональна ознака	Найменування моделі гідроударної машини		
		ПГБ - 1П	ПГБ - 2ПГ	ПГБ - 3В
1	2	3	4	5
1	Ідея конструктивного оформлення			
2	Тип корпусу	Корпус утворений втулкою 13, стаканом 7 і перехідником 1	Корпус складається з втулки 24 та стакана 18	Порожнистий корпус 5 із шлицьовою гільзою 2
3	Спосіб зв'язку бойка й ковадла	Пружина 17 з регульованими кільцями 23	Без пружини, жорстке розташування в камерах	Єдиний вузол – клапан-ударник 6 із інтегрованим бойком і клапаном
4	Тип каналів у бойку	Ненаскрізний центральний 27 + горизонтальний 10	Крізний центральний 6 + дренажний 26	Центральний 9 та бокові 10 канали в циркуляційному штоку
5	Наявність гідравлічних камер	Розгінна 15 і циркуляційна 20	Розгінна 5 і ударна 8 + пневмокамера 19	Розгінна 19 + вакуумна 15 + ударна 17 (з газом N ₂)
6	Тип ущільнень	Кільцеві гумові 22	Гумометалеві 27 і комбіновані 21, 22, 28	Багаторівневі кільця 11 і герметизатори 13

Закінчення таблиці 4

1	2	3	4	5
7	Особливості ковадла	Має шестигранну направляючу 6	Оснащене зовнішніми шліцями 16 та хвостовиком 20	Жорстко з'єднане через втулку 21 з інструментом 22
8	Додаткові елементи	Розгінна плита 16, контактні обмежувачі 8 і 21	Пневмокамера високого тиску 19, скидні вікна 23	Вакуумна камера 15, клапан-ударник 6, газонаповнення N ₂
9	Матеріал для виконання вузлів	Стандартні сталеві корпусні деталі	Можливі гумометалеві вставки	Високоміцні сталі, ущільнення для високого тиску й газу
10	Склад корпусу	Дві різьбові пари (1 - 13, 13 - 7)	Дві різьбові пари (1 - 24, 24 - 18)	Роз'ємна двочастинна секція 5 зі з'єднанням 29

Порівняння відмінних ознак (табл. 4) свідчить, що зміни в конструкціях зумовлені прагненням забезпечити найбільш можливу узгодженість між механічними, гідравлічними й енергетичними параметрами пристрою. Кожна новіша модель демонструє певне ускладнення внутрішньої архітектури, спрямоване на підвищення стабільності та довговічності роботи окремих вузлів та пристрою в цілому. При цьому спостерігається поступове зміщення акценту від простих пружинних систем до багатокамерних гідро- й газонаповнених конструкцій, що дозволяють більш ефективно контролювати процес формування удару. Використання різних типів ущільнень, матеріалів і способів з'єднання елементів показує технологічну гнучкість конструкторських рішень, адаптованих до різних умов буріння. Введення пневматичних та вакуумних камер, комбінованих клапанів, шліцьових з'єднань і багатоканальних систем свідчить про поступове зближення гідроударників із принципами високоточного машинобудування; вказане дає можливість зменшити втрати енергії, підвищити ефективність перетворення гідравлічної енергії потоку рідини в кінетичну енергію удару та збільшити ресурс основних деталей. Загальна тенденція розвитку простежується у напрямі інтеграції функцій певних вузлів і зменшення кількості окремих рухомих елементів, що істотно знижує ймовірність відмов. Таким чином, аналіз відмінних рис демонструє логіку конструктивного вдосконалення – від класичних схем із локальними регульовальними механізмами до складних систем із комбінованими енергетичними камерами та інтегрованими ударними блоками, які поєднують надійність і керованість у єдиній конструкції [5].

Порівняння конструкцій гідроударників показує, що попри значну різноманітність запропонованих і реалізованих технічних рішень, усі вони підпорядковані єдиній інженерній логіці – максимальному забезпеченню ефективного перетворення енергії потоку промивальної рідини в імпульси механічних ударів по породоруйнівному інструменту, причому кожен варіант конструкції реалізує цю мету через власну компоновку корпусу, систему камер і характер взаємодії основних робочих вузлів.

Конструктивна схема гідроударника безпосередньо визначає характер його роботи, адже геометрія камер, площі дії тиску, маса бойка та конфігурація каналів формують параметри енергетичного циклу [16]. Принцип функціонування гідроударних машин полягає у перетворенні потенційної енергії тиску промивальної рідини в кінетичну енергію руху бойка, а далі – у механічну роботу удару, що передається на породоруйнівний інструмент і вибій свердловини. Такий процес реалізується за рахунок створення у внутрішніх камерах пристрою контрольованого перепаду тиску, під дією якого поршень-бойок здійснює

поступальний рух, накопичуючи енергію потоку. На завершальній фазі розгінного ходу бойок взаємодіє з ковадлом або іншим елементом передавання зусилля, і кінетична енергія його руху перетворюється у короткочасний імпульс високої сили. Цей імпульс спрямовується на породоруйнівний інструмент, який здійснює локальне руйнування гірської породи; внаслідок цього відбувається ефективне поєднання двох впливів – ударного (імпульсного) та обертального, що істотно підвищує продуктивність.

У процесі розглянутої циклічної роботи гідроударника відбувається постійне чергування фаз нагнітання, розгону, удару та відновлення тиску. Для забезпечення стабільності цього процесу застосовуються системи клапанів, каналів і розгінних камер, які регулюють витрату рідини та синхронізують рух елементів [7]. Гідроударник функціонує як енергетичний перетворювач, що узгоджує параметри гідравлічної системи з механічною дією на вибій, перетворюючи енергію потоку у високоефективні короткочасні удари.

Розміри розгінної камери визначають максимальний хід бойка s та об'єм промивальної рідини, що бере участь у прискоренні. Площа робочого торця бойка A задає силу дії потоку

$$F = \Delta p \cdot A \quad (1)$$

Маса бойка m впливає на його швидкість v , а отже – на енергію удару

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2)$$

Таким чином, кожна конструкція реалізує свій власний діапазон робочих режимів через співвідношення вказаних параметрів.

Для гідроударників швидкість бойка v залежить від перепаду тиску в розгінній камері:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot A \cdot s}{m}} \quad (3)$$

При подачі промивальної рідини з тиском p у розгінну камеру бойок отримує прискорення, пропорційне перепаду тиску Δp , при цьому його кінцева швидкість, а отже і енергія удару, залежать від балансу між площею дії тиску, ходом та масою:

$$E = \Delta p \cdot A \cdot s \quad (4)$$

Конструктивні обмеження (довжина камери, форма каналів, демпфери) задають межі зміни цих параметрів, визначаючи допустимі режими роботи.

У пружинно-гідравлічних ударниках (модель ПГБ - 1П) енергія частково накопичується в пружині, тому амплітуда удару обмежена ходом і жорсткістю пружинного елемента [12].

У пневмогідравлічних ударних пристроях (модель ПГБ - 2ПГ) пневмокамера формує більш плавний, але потужніший розгін [13].

У вакуумкамерних гідроударних пристроях (модель ПГБ - 3В) частина енергії зберігається у стислому газі, що дозволяє ефективно регулювати енергію удару зміною тиску [14].

Таким чином, конструкція гідроударника визначає кінематику руху бойка, об'єм робочих камер і гідравлічний опір каналів – тобто всі умови, що впливають на величину E . Конструктивні параметри гідроударника безпосередньо формують його енергетичні характеристики та визначають ефективність перетворення гідравлічної енергії в механічну роботу удару. Від розмірів камер, маси бойка, площі дії тиску й конфігурації каналів залежить не лише потужність імпульсу, але й стабільність усього робочого циклу. Різні типи конструкцій – пружинно-гідравлічні, пневмогідравлічні та вакуумкамерні – реалізують власні принципи накопичення та регулювання енергії, що дозволяє адаптувати їх до конкретних геолого-технічних умов буріння свердловин.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Проведене порівняння показало, що всі розглянуті конструкції гідроударників ґрунтуються на єдиній модульній схемі, але відрізняються рівнем інтеграції та способом утворення робочих камер, що й визначає їх енергетичні можливості та сферу застосування.

2. Технічна еволюція від пружинно-гідравлічних до вакуумкамерних машин відображає послідовне вдосконалення конструктивних елементів, спрямоване на підвищення стабільності, ефективності та довговічності роботи пристроїв у складних геолого-технічних умовах.

3. Виявлено закономірність, згідно з якою основним шляхом підвищення ефективності гідроударників є не ускладнення конструкції, а оптимізація взаємодії робочих вузлів, зменшення втрат енергії та удосконалення системи регулювання параметрів формування ударного імпульсу.

4. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні комбінованих гідромеханічних систем з адаптивним керуванням енергетичними режимами, експериментальному визначенні оптимальних параметрів удару та розробленні цифрових моделей динаміки гідроударних процесів для прогнозування їх ефективності.

A.O. Ihnatov, I.K. Askerov

Dnipro University of Technology

RESEARCH AND IMPROVEMENT OF HYDRAULIC HAMMER DESIGNS FOR WELL DRILLING

This article presents a scientifically grounded analysis and comparison of new hydraulic hammer models of various types. The study aims to identify patterns in their successive design improvements, determine structural advantages and disadvantages, and establish a correlation between the configuration of key components and the energy parameters of the shock impulse generation process.

The principal patterns in the evolution of hydraulic hammer designs and their interrelation with the operating principle have been established. It was determined that all investigated types of hydraulic hammers—spring-hydraulic, pneumo-hydraulic, and vacuum-chamber—share a similar body architecture but differ in the nature of internal component interaction and the method of forming the working chambers. The research revealed that design complexity enables more precise control over the shock impulse parameters; however, it reduces maintainability and increases manufacturing precision requirements. A trend of transitioning from simple impact stabilization systems to more flexible schemes with controllable operating modes has been identified. Generalization of the results allowed for the formulation of the main directions for improving hydraulic hammers: design simplification while maintaining operational stability, reduction in the number of fast-wearing components, and enhancement of the technological adaptability of the devices for various drilling conditions.

The structural design principles of various hydraulic hammer types have been systematized, and the relationship between their structure and the nature of shock impulse formation has been determined. For the first time, a comparative analysis of spring-hydraulic, pneumo-hydraulic, and vacuum-chamber designs has been conducted, enabling the identification of design evolution patterns and the formulation of directions for their further improvement.

Key words: *hydraulic hammer, well drilling, design, piston, anvil, impact impulse, hydraulic system, comparative analysis, energy efficiency.*

Література

1. Ihnatov A. Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 2021. Vol. 15, N 3. P. 122–129.

- Lopez, J. C., Lopez, J. E., & Javier, F. *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis, 2017. 408 p.
- 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.
- Павличенко А.В., Ігнатів А.О., Аскеров І.К. Шляхи інтенсифікації вибійних породоруйнівних процесів при спорудженні свердловин. *Наукові праці донецького національного технічного університету*. 2022. 1(27)–2(28). С. 87–95.
- 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 Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1254. 012053. 13 p.
- Sadeghi J. *Uncertainty Modelling for Engineers: Version 0.1.1 (Version v0.1.1)*. Zenodo. Github publishing, 2021.
- Hossain, M.E., & Al-Majed, A.A. *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. Scrivener publishing 2015. 771 p.
- Пристрій для гідрударного буріння. пат. 151535. Україна: МПК E21B4/14; опубл. 10.08.2022. Бюл. № 32.
- Гідрударник для буріння пат. 151571. Україна: МПК E21B4/14; опубл. 17.08.2022. Бюл. № 33.
- Гідрударник для буріння пат. 151453. Україна: МПК E21B4/00; опубл. 27.07.2022. Бюл. № 30.
- Speight J.G. *Formulas and calculations for drilling operations. Second Edition*. Scrivener Publishing, 2018. 286 p.
- Modi P.N., Seth, S.M. *Hydraulics and Fluid Mechanics Including Hydraulics Machines*. 22nd Edition. Standard book house since 1960, 2019. 1419 p.

Надійшла 03.11.25

References

- Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 122–129.
- Lopez, J. C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis.
- Pashchenko, O., Koroviaka Ye., Semekhin, V.Yu., et al. (2021). Deiakhi poiasnennia udarnoho mekhanizmu vplyvu na hirski porody pry burinni sverdlovyn [Some explanations of the impact mechanism on rocks when drilling wells]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Collection of research papers of the NMU*, 3(66), 177–192 [in Ukrainian].
- Pavlychenko, A.V., Ihnatov, A.O., Askerov, I.K. (2022). Shliakhy intensyfikatsii vybiinykh porodoruivnykh protsesiv pry sporudzhenni sverdlovyn [Ways to intensify downhole processes of rock destruction during well construction]. *Naukovi pratsi donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific works of Donetsk National Technical University*, 1(27)–2(28). 87–95 [in Ukrainian].
- 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.
- Jonathan Sadeghi (2021). *Uncertainty Modeling for Engineers*. Github publishing.
- Hossain, M.E., & Al-Majed, A.A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. Scrivener publishing.

8. Ihnatov, A.O., Askerov I.K. (2022). *Patent of Ukraine № 151535. МПК E21B4/14. Prystii dlia hidroudarnoho burinnia. [Device for water hammer drilling]. (Patent Ukrainy № 151535) [in Ukrainian].*
9. Ihnatov, A.O., Askerov I.K. (2022). *Patent of Ukraine № 151571. МПК E21B4/14. Hidroudarnyk dlia burinnia. [Hydraulic hammer for drilling]. (Patent Ukrainy № 151571) [in Ukrainian].*
10. Pavlychenko A.V., Ihnatov, A.O., Koroviaka Ye.A., Rastsvietaiev V.O., Zahrytsenko A.M., Askerov I.K. (2022). *Patent of Ukraine № 151453. МПК E21B4/00. Hidroudarnyk dlia burinnia. [Hydraulic hammer for drilling]. (Patent Ukrainy № 151453) [in Ukrainian].*
11. Speight, J.G. (2018). *Formulas and calculations for drilling operations. Second Edition.* Scrivener publishing.
12. Modi, P.N., & Seth, S.M. (2004). *Fluid mechanics and hydraulic machines.* Standard Book House.

УДК 622.245.4

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-102-117

Є.М. Ставичний, канд. техн. наук¹, **А.О. Ігнатів**, канд. техн. наук²

¹ПАТ «Укрнафта», Несторівський пров., 3-5, 04053, Київ, Україна, e-mail: stavichnyi@i.ua

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: A_3000@i.ua

ПІДВИЩЕННЯ ДОСКОНАЛОСТІ ЦЕМЕНТУВАННЯ ЯК ОСНОВА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН НАФТОГАЗОВИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ

В статті розглянуто питання удосконалення технології кріплення й цементування свердловин за знижених пластових тисків, яке передбачає раціональне очищення каверн від глинисто-шламових відкладень та оптимізацію рецептур тампонажних розчинів (зокрема полегшених), що має забезпечити формування довговічного герметичного цементного кільця й підвищити надійність експлуатації нафтогазових свердловин.

Встановлено, що за наявності кавернозних інтервалів та знижених пластових тисків застосування базових полегшених тампонажних матеріалів приводить до формування ослабленого, неоднорідного цементного каменю з низьким зчепленням з обсадною колоною та породою, що не забезпечує належної міжпластової ізоляції. Показано обмежену ефективність традиційних механічних засобів підготовки стовбура і доведено переваги поінтервального гідравлічного пристрою, здатного інтенсифікувати очищення каверн від глинисто-шламових відкладень. Лабораторні дослідження наростання міцності в термобаричних умовах продемонстрували істотно нижчі та повільніше зростаючі міцнісні характеристики полегшених систем порівняно з розчинами нормальної густини, що обґрунтовує необхідність оптимізації їх рецептур з урахуванням седиментаційної стійкості та мікроструктури цементного каменю.

Отримані результати дають змогу вдосконалити технологію кріплення й цементування свердловин за умов кавернозності стовбура та знижених пластових тисків за рахунок цілеспрямованого вибору способів очищення каверн і оптимізації складу полегшених тампонажних розчинів. Запропоновані підходи можуть бути використані при проєктуванні технології цементування експлуатаційних свердловин для підвищення надійності міжпластової ізоляції та зниження ризику виникнення необхідності здійснення ремонтно-ізоляційних робіт.