

**А.О. Ігнатов**, канд. техн. наук, **А.В. Павличенко**, д-р техн. наук,  
**Я.М. Літвінов**, **І.К. Аскеров**

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького,  
19, 49027, м. Дніпро, Україна, e-mail: A\_3000@i.ua*

## **ВИВЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИМИ ТЕХНІЧНИМИ ЗАСОБАМИ В НАФТОГАЗОВОМУ БУРІННІ**

*В статті обґрунтовано підходи до оптимального керування інноваційними технічними засобами буріння з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей на основі аналізу параметрів обладнання, режимів роботи та геологічних умов, що в комплексі забезпечить підвищення ефективності, надійності та безпеки спорудження свердловин.*

*Результати досліджень показали, що впровадження інноваційних пристроїв для направленої буріння та регулювання осьового навантаження дозволяє підвищити точність формування траєкторії споруджуваної свердловин, стабільність і ефективність руйнування порід, оптимізувати осьові та крутні навантаження, знизити знос бурильного інструменту та підвищити продуктивність буріння. Виявлено потенціал інтеграції цих пристроїв у системи автоматичного керування буровим процесом для адаптивної оптимізації роботи в реальному часі.*

*Практична значущість представленого дослідження полягає у підвищенні ефективності та надійності процесу буріння завдяки використанню інноваційних пристроїв і можливості інтеграції їх у системи автоматичного керування, що дозволяє оптимізувати робочі режими, знизити знос обладнання та витрати, а також забезпечити точність і безпеку спорудження свердловин.*

**Ключові слова:** *направлене буріння, осьове навантаження, інноваційні пристрої, оптимальне керування, бурова техніка, автоматизація, ефективність, стабільність траєкторії.*

### **Постановка проблеми**

У сучасній нафтогазовій промисловості (сюди обґрунтовано можна включити і геологорозвідувальну з гірничо-видобувною) буріння свердловин є одним із найбільш складних та капіталомістких процесів, який потребує застосування передових технологій та інноваційних технічних засобів [1]. Зі зростанням складності гірничо-геологічних умов (цілком закономірним), проведенням робіт з видобутку в трудно доступних місцях або на глибоководних родовищах, а також суттєвим підвищенням вимог до економічної та екологічної безпеки, виникає потреба не лише в корінній модернізації бурового обладнання та інструменту, але й у розробці доволі ефективних методів оптимального керування ним [2].

Процес оптимального керування технічними засобами буріння включає використання автоматизованих систем моніторингу, адаптивних алгоритмів управління, інтелектуальних датчиків та інноваційних бурових установок, обладнання, інструменту тощо. Такий підхід дозволяє забезпечити максимальну продуктивність свердловин при одночасному зниженні витрат матеріалів, енергії та часу на виконання робіт. Крім того, він дозволяє мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із геологічними ускладненнями в стовбурі споруджуваної свердловини, неефективністю процесів руйнування гірської породи на вибої свердловини, інтенсивним викривленням та деформаціями стовбура, а також багатьма іншими несприятливими факторами спорудження свердловин [3].

Дослідження можливостей оптимального керування інноваційними технічними засобами відкриває перспективи для прогнозування поведінки бурових систем у реальному часі, адаптації режимів буріння до зміни геологічних умов і підвищення загальної безпеки робіт; застосування

позначених методів стає ключовим фактором конкурентоспроможності нафтогазових компаній та ефективності інвестицій у розробку нових родовищ [4]. Інтеграція інноваційних технічних засобів із системами оптимального керування є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасної технології буріння, який забезпечить збалансоване поєднання технологічної досконалості, економічної ефективності та високих стандартів безпеки виробничих процесів.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Слід підкреслити, що питання оптимального керування технічними засобами під час буріння свердловин різного призначення активно досліджується як у світовій, так і в українській науково-технічній спільноті. Сучасні тенденції розвитку розглядуваного нами напрямку досліджень зосереджені на впровадженні цифрових технологій, автоматизованих систем керування, адаптивних алгоритмів та елементів штучного інтелекту, що забезпечують підвищення ефективності виконання бурових операцій в складних геолого-технічних умовах і зниження виробничих ризиків.

У працях українських учених [5–7] розглянуто окремі методи оптимізації параметрів буріння, математичне моделювання процесів взаємодії інструмента з гірською породою, удосконалення систем автоматизованого управління та створення інтелектуальних інформаційних систем підтримки рішень; позначені нами дослідження дозволили закласти основу для розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення стабільності роботи бурових установок і запобігання ускладненням під час спорудження свердловин.

У зарубіжних публікаціях [8 - 10] основна увага приділяється застосуванню алгоритмів машинного навчання, а також побудові адаптивних систем реального часу для керування окремими параметрами процесу буріння; позначені підходи забезпечують можливість прогнозування стану системи та динамічної адаптації режимів роботи до змін геологічних умов.

Попри значний обсяг проведених досліджень, подальшого розвитку потребують питання комплексної оптимізації процесів буріння, які враховують взаємодію технічних, технологічних і організаційних факторів. Особливої актуальності набувають моделі, що поєднують дослідження інноваційних технічних засобів з методами інтелектуального керування для досягнення максимальної продуктивності та безпеки бурових робіт.

### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Незважаючи на значний прогрес у питаннях впровадження прогресивних методів і прийомів у технологію виконання бурових робіт, низка аспектів саме оптимального керування інноваційними технічними засобами залишається недостатньо дослідженою. Передусім це стосується створення комплексних моделей керування, які одночасно враховують змінність геологічних умов, динамічні характеристики роботи бурового інструмента та фізико-хімічні параметри різноманітних промивальних рідин в реальному часі [11].

Більшість існуючих техніко-технологічних рішень, в означеній нами галузі, орієнтовані, здебільшого, на локальну оптимізацію окремих етапів процесу буріння – наприклад, вибір режиму обертання породоруйнівного інструменту або стабілізацію тиску циркулюючої промивальної рідини. Однак питання інтеграції означених нами підсистем у єдину адаптивну систему управління, здатну самостійно коригувати режими роботи обладнання на основі поточних даних, залишається досі відкритим.

Недостатньо розробленими є й підходи до поєднання алгоритмів штучного інтелекту з традиційними методами математичного моделювання, що обмежує точність прогнозування поведінки бурових систем у складних геологічних умовах, де змінюється, зокрема, структура гірських порід, тиск і температура. Також відсутні стандартизовані методики оцінювання ефективності впровадження інтелектуальних систем управління у практичних умовах експлуатації різних типів свердловин.

Таким чином, актуальним завданням сучасних досліджень є розроблення комплексних підходів до оптимального керування інноваційними технічними засобами, що поєднують

математичні, інформаційні та технологічні рішення для підвищення ефективності, надійності та безпеки процесів буріння.

Мета статті полягає в обґрунтуванні та розробленні підходів до оптимального керування інноваційними технічними засобами буріння свердловин з урахуванням їхніх конструктивних і технологічних особливостей, що передбачає аналіз взаємозв'язку між параметрами бурового обладнання, режимами роботи та умовами геологічного середовища з метою підвищення ефективності, надійності та безпеки процесів спорудження свердловин.

### **Обґрунтування вживання і опис вибраної автором методики**

Визначення основних конструктивно-технологічних особливостей вибраних пристроїв виконано з використанням комплексного методичного підходу, що поєднав аналітичні та експериментальні дослідження, математичне й фізичне моделювання, а також теоретичну обробку й інтерпретацію результатів за допомогою сучасних контрольно-вимірювальних приладів, інструментарію й матеріалів [12]. Методика передбачала багатоетапну процедуру: формалізацію технічних вимог, побудову фізичних моделей контактної взаємодії робочих елементів із породою, чисельну реалізацію багатфакторних сценаріїв роботи. Особлива увага приділялася проблематиці дослідження, зокрема варіабельності фізико-механічних властивостей гірських порід, нелінійній динаміці контактних процесів, впливу гідродинамічних умов циркуляції та експлуатаційної зношеності рухомих елементів. Крім того, методика включала вимоги до сенсорики й телеметрії для коректного збору даних у реальному часі (тензометри, інклінометри, датчики крутного моменту й тиску, акселерометри) та процедури контролю якості вимірювань. Такий підхід дозволив не лише встановити конструктивно-технологічні закономірності роботи пропонованих пристроїв, але й виокремити межі застосовності розроблених рішень, критичні режими роботи і рекомендації щодо подальшої оптимізації пропонованих конструкцій і алгоритмів керування.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Досягнення поставленої мети досліджень потребує поєднання теоретичних засад оптимального керування з практичним вивченням пропонованих до застосування інноваційних конструктивних рішень, оцінювання їх потенційних технологічних можливостей і визначення критеріїв оптимізації, що забезпечують раціональне використання технічних ресурсів і зниження енергетичних витрат у процесі буріння свердловин [13].

Виконання оптимального керування інноваційними технічними засобами неможливе без глибокого аналізу конструктивних елементів бурового обладнання та інструменту, таких як приводи обертання, долота (і загалом породоруйнівний інструмент), бурильні колони, елементи компоновки низу бурильної колони та циркуляційне обладнання. Кожен із цих компонентів впливає на загальну ефективність процесу буріння через власні параметри – зокрема, крутний момент, швидкість обертання, осьове навантаження, витрату та тиск промивальної рідини. Тому важливо дослідити не лише окремі параметри, а й взаємодію між ними у змінних геологічних умовах [14].

Технологічні основи оптимального керування полягають у використанні адаптивних алгоритмів і систем моніторингу, здатних у режимі реального часу оцінювати стан бурового комплексу та вносити необхідні корективи у роботу обладнання, що дозволяє підтримувати стабільність процесу поглиблення вибою споруджуваної свердловини [2], зменшувати ризики аварійних ситуацій, попереджати перевантаження інструмента і втрати циркуляції.

В межах даного дослідження основна увага приділяється аналізу взаємозв'язку між конструктивними характеристиками інноваційних бурових засобів і технологічними параметрами їх функціонування; вказаний підхід дозволяє визначити раціональні режими буріння, розробити критерії ефективності та сформулювати наукові основи для побудови системи

оптимального керування, яка забезпечить максимальну продуктивність і надійність робіт під час спорудження свердловин.

Доволі перспективним напрямом оптимізації процесів буріння можна вважати впровадження інноваційних конструкцій пристроїв для керованого (направленого) буріння, що дозволяють забезпечити стабільне викривлення стовбура свердловини відповідно до заданого профілю. Розглянемо запропонований нами варіант конструкції удосконаленого пристрою, призначеного для штучного викривлення свердловин (або коригування їх траси), який поєднує високу точність орієнтації з підвищеною стабільністю роботи незалежно від твердості порід і величини осьового навантаження.

На відміну від відомих аналогів [15–16], запропонована конструкція усуває їхні основні недоліки – складність, нестійкість та труднощі регулювання кута перекосу. Інноваційна модель (з умовним позначенням НБ - 1Л) включає корпус із уздовж встановленим породоруйнівним органом, утвореним ланцюгами з зубчастими дисками, які розташовано співвісно зі збільшенням діаметра у напрямку до зовнішньої поверхні. У верхній частині корпусу через зубчасте з'єднання зі змінною втулкою встановлено шарнірний механізм, що забезпечує просторову орієнтацію пристрою під час роботи [17].

Робота пристрою НБ - 1Л базується на кінематичній взаємодії зубчастих дисків, зірочок і ланцюгів, що одночасно контактують із вибоєм і стінками свердловини. Така взаємодія створює плавний набір кривизни, жорстке центрування та якісне калібрування стінок свердловини без їхнього надмірного розроблення. Гвинтоподібний рух породоруйнівних елементів сприяє стабільності процесу руйнування породи та забезпечує сумарне формування кута викривлення ( $\alpha + \beta + \gamma$ ), контрольованого за допомогою втулки шарніра.

Конструктивні відмінності пристрою – змінність робочих органів, наявність втулки для обмеження кута перекосу та варіативність діаметрів зубчастих дисків – дозволяють регулювати інтенсивність викривлення залежно від умов буріння. Крім того, при симетричному розташуванні дисків пристрій може застосовуватись для виправлення викривленого стовбура свердловини. Завдяки такому прогресивному конструктивно-технологічному рішенню (табл. 1) забезпечується значне підвищення точності штучного викривлення, стабільність орієнтації бурового інструмента, раціональне використання осьового навантаження та зростання рейсової швидкості буріння; очікуваний приріст техніко-економічних показників становить 80 - 110%, що свідчить про значний потенціал застосування цього приладу в системах оптимального керування процесом направлено буріння.

Виконаний нами аналіз (табл. 1) конструктивно-технологічних складових запропонованого пристрою НБ - 1Л для направлено буріння показує, що він має високу інноваційність та значний потенціал для оптимального керування процесом буріння свердловин. Основні його переваги включають такі фактори: прогресивна новизна конструкції, стабільність процесу орієнтації та адаптивність, регульованість та модульність, енергоефективність та інтенсивність руйнування, перспективи автоматизації.

Порівняно із загальноприйнятим конструктивним підходом та найближчим аналогом, запропонований пристрій НБ - 1Л демонструє вищий рівень контролю та стабільності, що безпосередньо впливає на точність виконання геологічного завдання; ризики, пов'язані з рухомими елементами (знос, заклинювання, необхідність калібрування), є контрольованими за умови планового технічного обслуговування та моніторингу стану пристрою.

Запропонований пристрій можна розглядати як інноваційний та перспективний елемент для підвищення ефективності та точності буріння, що створює передумови для впровадження інтелектуальних систем оптимального керування процесом поглиблення стовбура свердловини.

Таблиця 1. Характеристика інноваційних конструктивно-технологічних складових пристрою для направленої буріння свердловин

| Конструктивно-технологічний критерій           | Найменування прийнятих до аналізу пристроїв  |   |  | Оцінка впливу на оптимальне керування  |
|--|--|---|--|--|
|  | Запропонований пристрій НБ - 1Л  | Загальноприйнятий конструктивний підхід   | Найближчий аналог  |  |
| 1  | 2  | 3   | 4  | 5  |
| Новизна конструкції                            | Висока – комбіновані ланцюги із зубцями, ступеневі диски, змінна втулка для обмеження кута | Низька – простий корпус + висувний повзун | Середня – шарнірний перехідник, але жорстке та складне керування кутом         | Позитивна – дає додаткові параметри керування (діаметри дисків, втулка)                          |
| Стабільність орієнтації                        | Висока – жорстке центрування, калібрування стінок, гвинтоподібний рух                      | Низька – нестабільність вузлу викривлення | Низька/середня – інтенсивне викривлення при осьовому навантаженні              | Перевага: зменшує варіативність реакції на навантаження → кращий контроль                        |
| Регульованість кута перекосу                   | Середня/висока – змінна втулка обмежує кут, можливість заміни робочих органів              | Низька – складне регулювання              | Низька – складність регулювання кута   | Дає можливість встановити обмеження та ввести керувану змінну у алгоритм                         |
| Модульність / обслуговування                   | Висока – оперативна заміна ланцюгів і дисків у польових умовах                             | Низька – складність конструкції           | Середня – складні механічні вузли  | Позитивно для експлуатаційної оптимізації та швидкого налаштування під умови                     |
| Енергоефективність та інтенсивність руйнування | Висока – сколювання, знакозмінні моменти, ефективне руйнування                             | Низька – менш ефективне руйнування        | Середня – інтенсивне викривлення при навантаженні (може перевитрачати енергію) | Можна оптимізувати ROP та витрату енергії через керування крутним моментом/осьовим навантаженням |

Закінчення таблиці 1

| 1  | 2   | 3                                    | 4                                     | 5   |
|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Стійкість до зміни твердості порід                 | Висока – конструктивні елементи забезпечують незалежність від твердості     | Низька                               | Низька                                | Важлива перевага: спрощує адаптивне керування без постійного переналаштування         |
| Можливість інтеграції з автоматикою/телеметрією    | Середня – механічна природа, потребує додаткових датчиків для автоматизації | Низька                               | Низька/середня                        | Потребує доповнення сенсорами і приводами для повноцінного оптимального керування     |
| Ризики реалізації (знос, заклинювання, складність) | Середні – рухомі ланцюги/диски; необхідне очищення, тонке калібрування      | Високі – нестабільність роботи вузлу | Середні – складність регулювання кута | Ризики пом'якшуються плановим техобслуговуванням і контролем стану                    |
| Очікуваний техніко-економічний ефект               | 80 -110% (згідно оціночним розрахункам) – значний потенціал                 | Н/д                                  | Менший приріст                        | Великий потенціал, але реалізація залежить від інтеграції з керуванням і експлуатації |

Для ефективного впровадження інноваційних пристроїв у процес буріння необхідно оцінити потенційні підходи до оптимального керування, визначити перелік датчиків та систем моніторингу, а також прогнозовані техніко-економічні показники; в табл. 2 систематизуються ці аспекти для ключових конструктивно-технологічних елементів пристрою для направленої буріння, що дозволяє: визначити пріоритетні параметри для автоматизації та дистанційного контролю; проаналізувати взаємодію між механічними компонентами та системами керування; оцінити очікуваний вплив на продуктивність, точність і енергоефективність процесу буріння. Цей підхід дозволяє наочно зіставити технічні характеристики пристроїв із можливостями їх інтеграції в автоматизовані системи управління, забезпечуючи основу для розробки адаптивних алгоритмів оптимізації процесу буріння.

Аналіз підходів до оптимального керування (табл. 2) показує, що поєднання інноваційних конструктивних рішень із системами контролю забезпечує значне підвищення ефективності бурового процесу. Основні спостереження: датчики кута викривлення, осьового навантаження, обертового моменту та тиску промивальної рідини дозволяють реалізувати адаптивне керування у реальному часі, забезпечуючи стабільність і точність роботи пристрою; зміна кута перекосу, регулювання осьового навантаження та швидкості буріння на основі даних сенсорів дозволяє мінімізувати знос обладнання та енергетичні витрати; очікувані переваги полягають у підвищенні продуктивності, точності формування траєкторії стовбура

свердловини, зниженні витрат на обслуговування і ремонт, а також у появі можливості стабільного виконання геологічного завдання.

Таблиця 2. **Можливі підходи до оптимального керування пристроєм для направленою буріння свердловин НБ - 1Л**

| Стратегія керування  | Необхідне інструментальне забезпечення  | Керовані змінні (важливі важелі)  | Очікувані переваги   | Складність впровадження                               |
|--|---|---|--|---|
| Адаптивний PID для осьового навантаження та обертів          | тензометр осьового зусилля; тахометр обертів; датчик моменту                                    | обертובה швидкість, осьове навантаження                                 | швидка стабілізація режиму, зниження перевантажень                             | Низька-середня  |
| MPC (Model Predictive Control)                               | ті ж + модель взаємодії ланцюгів із вибоєм; дані про тиск промивальної рідини; датчики вібрацій | прогнозоване обмеження кута, обертів, крутного моменту, витрати рідини  | оптимальний баланс ROP і зносу, мінімум простоїв                               | Середня-висока  |
| Онлайн ідентифікація + адаптивне управління                  | датчики твердості/індикатори зміни параметрів буріння, акустичні/вібро-датчики                  | підстроювання PID/MPC по режимах порід                                  | стабільність при зміні порід   | Середня   |
| RL / машинне навчання (для оптимізації траєкторії і режимів) | повний пакет: RT телеметрія, позначки траєкторії  | крутний момент, осьове навантаження, кут втулки (керована втулка/зміна) | потенційно високий приріст ROP та зниження витрат; адаптація до невідомих умов | Висока (потрібні дані, симулятори, безпечне навчання) |
| Автоматичне обмеження кута (механічно + електронно)          | датчик кута, положення втулки; зворотний зв'язок  | механічна втулка (параметр), електропривід / фіксація                   | гарантія геометрії профілю, захист інструмента                                 | Низька-середня  |

Наступним важливим інноваційним елементом у системах оптимального керування процесом буріння є пристрій для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК, призначений для забезпечення необхідного осьового зусилля під час буріння свердловин середньої та високої твердості порід [18]. Позначений нами пристрій дозволяє підвищити ефективність руйнування породи, знизити знос бурильних труб та збільшити рейсову швидкість буріння,

що є критичним для інтенсифікації процесу спорудження свердловини різного промислового призначення; його компактна конструкція забезпечує рухомість навіть у викривлених ділянках стовбура свердловини; дозволяє збільшити ефективність створення осьового навантаження незалежно від міцності гірських порід; реалізує можливість використання як зі стандартною бурильною колоною, так і з безперервною (гнучкі труби – колтубінг).

Конструктивно пристрій ПСН - 1ГК включає рознімний корпус із центральними циркуляційними каналами для подачі промивальної рідини, шліцьові повзуни, дреселі з кульковими клапанами, гідравлічні рухові блоки з зубчастими колесами та упорні ланцюгові механізми, які забезпечують взаємодію з поверхнею свердловини. Крутий момент приводних валів передається на ланцюгові механізми та інструментальні ланцюги, що забезпечують контрольоване переміщення корпусу та підтримку необхідного осьового навантаження на породоруйнівні інструменти.

Принцип роботи пристрою ПСН - 1ГК базується на перетворенні енергії потоку промивальної рідини на обертальний рух приводних валів та радіальне переміщення шліцьових повзунів у похилих гніздах. Це дозволяє підтримувати стабільне осьове зусилля, оптимально адаптоване до властивостей гірських порід, забезпечуючи ефективне руйнування без надмірного зносу обладнання. Крім того, конструкція передбачає можливість оперативного монтажу, демонтажу та ремонту окремих елементів, що значно підвищує практичну зручність використання пристрою в польових умовах.

Впровадження такого інноваційного рішення дозволяє забезпечити стабільну роботу бурового інструмента, високий рівень точності регулювання осьового навантаження та підвищення продуктивності буріння (табл. 3), що відкриває нові можливості для оптимального керування процесом спорудження свердловин у складних геологічних умовах.

**Таблиця 3. Принципові інноваційні конструктивно-технологічні складові пристрою для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК**

| Параметр / характеристика розглядуваного пристрою | Потенціал інноваційності  | Перспективи оптимального управління   | Коментар / порівняння з аналогами  |
|---|---|---|--|
| 1   | 2   | 3   | 4  |
| Конструкція пристрою                              | Компактний рознімний корпус з шліцьовими повзунами та упорними ланцюговими механізмами      | Дозволяє автоматичну адаптацію осьового навантаження до властивостей порід                              | У порівнянні з відомими аналогами, зменшено довжину та підвищено маневреність        |
| Механізм створення осьового навантаження          | Використання гідравлічних блоків і перетворення енергії промивальної рідини на рух повзунів | Можлива інтеграція з системами автоматичного контролю подачі рідини для підтримки заданого навантаження | У старих конструкціях осьове зусилля було нестабільним і залежало від міцності порід |

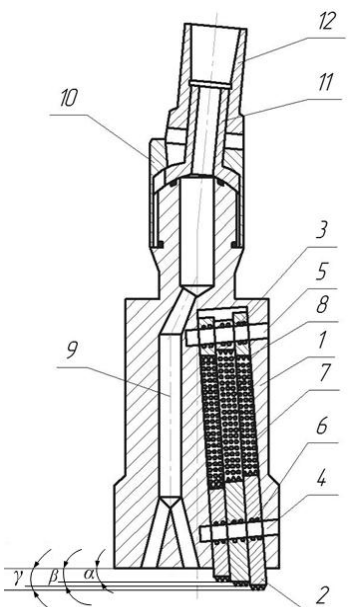
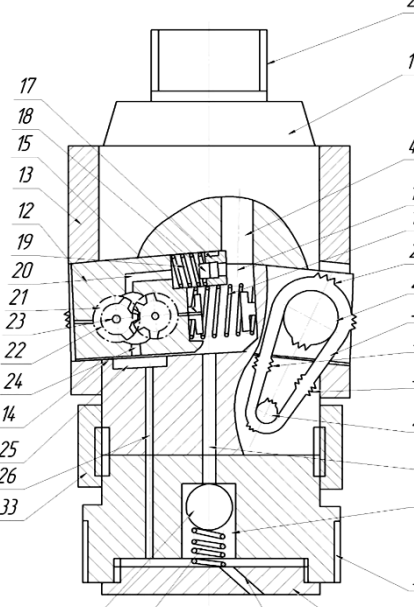
Закінчення таблиці 3

| 1                            | 2   | 3  | 4  |
|------------------------------|---|--|--|
| Регулювання та контроль      | Поворотні пружини, дроселі, замкові елементи та шліцьові повзуни                                | Дозволяє змінювати величину осьового зусилля у реальному часі, потенціал підключення до інтелектуальної системи управління | Аналоги потребували ручного налаштування, що знижувало точність                                  |
| Практична зручність          | Рознімний корпус, можливість оперативного ремонту та заміни елементів                           | Легко інтегрується у бурову колону, можливість адаптації під різні режими буріння  | Забезпечує високий ресурс роботи без підйому на поверхню, у порівнянні з традиційними пристроями |
| Ефективність процесу буріння | Стабільне осьове навантаження, контрольований контакт з гірською породою                        | Може бути частиною системи оптимального керування бурінням з підвищенням швидкості і зниженням зносу                       | Очікуване підвищення продуктивності та зниження витрат у порівнянні з попередніми конструкціями  |
| Інноваційність               | Синхронне використання шліцьових повзунів, гідравлічних блоків та упорних ланцюгових механізмів | Можлива інтеграція з сенсорними та автоматизованими системами контролю   | Принципово новий підхід до перетворення гідравлічної енергії у контрольоване осьове навантаження |

Розглянутий пристрій для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК (табл. 3) вирізняється компактною і маневреною конструкцією, стабільним механізмом створення навантаження та можливістю регулювання у реальному часі. Завдяки інтеграції гідравлічних блоків, шліцьових повзунів та упорних ланцюгових механізмів він забезпечує підвищену ефективність буріння, зменшення зносу інструменту та легку адаптацію під різні режими роботи. Принципово новий підхід дозволяє інтегрувати пристрій з автоматизованими та сенсорними системами управління, що відкриває перспективи для оптимізації процесу буріння у порівнянні з традиційними аналогами [19–20].

На основі аналізу принципів ознак конструктивно-технологічних складових розглянутого пристрою для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК доцільно провести порівняльну оцінку двох інноваційних пристроїв. Такий підхід дозволяє наочно визначити відмінності в інноваційності, ефективності та потенціалі для оптимального керування, а також виявити переваги кожного рішення у контексті сучасних вимог до технології виконання бурових операцій; результати вказаного порівняння представлені у наступній табл. 4 (наочна схематична оцінка двох інноваційних пристроїв представлена у вигляді умовної шкали 0–10 балів інноваційності та керованості, де 10 – максимальна інноваційність або максимальний потенціал оптимального керування).

Таблиця 4. Порівняльна характеристика інноваційних пристроїв для раціоналізації процесу спорудження свердловин

| Параметр пристрою    | Пристрій для направлено буріння НБ - 1Л   | Пристрій для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК   | Коротка якісна оцінка   |
|----------------------|---|--|---|
| 1                    | 2   | 3  | 4   |
| Конструкція пристрою |   |   | —   |
| Коротка експлікація  | <p>У пристрої для направлено буріння міститься корпус 1, в якому уздовж встановлено породоруйнівний орган, який складається з ланцюгів 7, що виступають за межі контуру корпусу, та зубчастих дисків 2, які встановлено співвісно, із відповідним збільшенням їх діаметра в напрямку до зовнішньої стінки корпусу, в верхній частині якого за допомогою зубчастого з'єднання та змінної втулки 10 встановлено шарнірний механізм 11</p> | <p>Пристрій для створення осьового навантаження містить розташовані з протилежних боків у верхній частині корпусу 1 робочі камери 11, кожна з яких має сполучений із переливним дроселем 17 гідравлічний блок, виконаний з можливістю його обертання при заповненні промивальною рідиною та пов'язаний із замком дросельного типу 15, які разом утворюють шліцьовий повзун 12, на вихідному валу якого розташовано упорний ланцюговий контактний елемент, що виконаний з можливістю кутового переміщення під час радіального переміщення повзуна</p> | —   |
| Інноваційність       | 8   | 9  | Другий пристрій поєднує гідравліку, механіку і автономне регулювання, що трохи перевищує перший |

Закінчення таблиці 4

| 1                                 | 2   | 3   | 4  |
|-----------------------------------|-----|-----|--|
| Потенціал автоматичного/оптимальн | 7   | 9   | Осьове навантаження легше інтегрувати в автоматизовану систему з контролем подачі рідини та моментів на інструмент |
| Технологічна ефективність         | 8   | 9   | Другий пристрій забезпечує більш стабільне і контрольоване руйнування порід та менший знос труб                    |
| Практична адаптивність            | 8   | 8   | Обидва пристрої легко обслуговуються та піддаються заміні робочих елементів у польових умовах                      |
| Маневреність/компактність         | 7   | 8   | Другий пристрій менше залежить від довжини колони і краще працює в викривлених ділянках свердловини                |
| Загальна оцінка                   | 7,6 | 8,6 | Оцінка усереднена за основними показниками інноваційності та потенціалу оптимального управління                    |

Порівняльний аналіз інноваційних пристроїв для раціоналізації процесу спорудження свердловин (табл. 4) засвідчує, що обидва розроблені рішення мають високий технічний рівень і потенціал для інтеграції в системи оптимального керування, однак їх функціональні акценти різняться.

Пристрій для створення осьового навантаження ПСН - 1ГК має вищий рівень інноваційності (9 балів), оскільки поєднує гідравлічні, механічні та регуляційні елементи, що дозволяє автоматизувати зміну навантаження під час буріння. Пристрій для направленої буріння НБ - 1Л також інноваційний (8 балів), проте його конструктивна складність вища, а ступінь автоматизації обмежена механічною природою вузлів. Пристрій для створення

осьового навантаження має перевагу завдяки простішій інтеграції в телеметричні та гідравлічні системи керування, що забезпечує точне регулювання осьового тиску й моменту обертання у реальному часі. Пристрій направлено буріння потребує складнішої системи зворотного зв'язку, але відкриває можливості для локального контролю траєкторії свердловини. Обидва пристрої демонструють достатньо високу ефективність (8 - 9 балів), однак другий вирізняється кращою стабільністю руйнування порід і зменшеним зносом бурового інструменту; вказане робить його більш придатним для умов із підвищеною абразивністю гірських порід або змінними фізико-механічними властивостями. Обидва пристрої характеризуються високою ремонтпридатністю і модульністю, що спрощує їх експлуатацію та адаптацію до різних геолого-технічних умов.

Усереднені показники оцінювання (7,6 і 8,6) свідчать, що пристрій для створення осьового навантаження має дещо вищий інтеграційний потенціал для систем оптимального керування. Проте пристрій для направлено буріння залишається незамінним компонентом у задачах точного коригування траєкторії споруджуваної свердловини.

Комплексне застосування обох пристроїв – системи направлено буріння та регульованого осьового навантаження – забезпечує синергетичний ефект; їх поєднання створює передумови для формування адаптивної автоматизованої системи буріння, здатної в режимі реального часу підтримувати оптимальні параметри роботи породоруйнівної вибійної компоновки, зменшувати енерговитрати і підвищувати ресурс бурового інструменту.

### **Висновки**

1. Розглянуті конструкції демонструють високу інноваційність і значний оціночний техніко-економічний потенціал; пристрій для осьового навантаження ПСН - ІГК забезпечує кращу інтегрованість у системи автоматизації; пристрій для направлено буріння НБ - 1Л дає високу точність формування траєкторії; в подальшому необхідно провести лабораторно-польові випробування для верифікації оцінок продуктивності та уточнення чисельних показників ROP, зносу та енерговитрат.

2. Досягнення оптимального керування можливе лише за умови оснащення пристроїв повною сенсорикою та розробки для них адаптивних алгоритмів; в перспективі необхідно розробити та протестувати багаторівневу архітектуру керування.

3. Рухомі робочі органи підвищують ефективність, але створюють ризики зносу, заклинювання та потребують промивки/очищення, проте модульність конструкцій спрощує обслуговування; в подальшому необхідно оптимізувати матеріали й конструкції (тверді сплави, покриття, ущільнення), впровадити системи моніторингу стану і регламент технічного обслуговування.

4. Найбільший ефект дає синергетична інтеграція обох пристроїв у єдину автоматизовану систему, проте реальний ефект залежить від системного впровадження і масштабності польових випробувань; в подальшому необхідно підготувати техніко-економічне обґрунтування і методик оцінки.

**A.O. Ihnatov, A.V. Pavlychenko, Ya.M. Litvinov, I.K. Askerov**

*Dnipro Polytechnic National Technical University*

### **STUDY OF OPTIMAL CONTROL POTENTIAL FOR INNOVATIVE EQUIPMENT IN OIL AND GAS DRILLING**

*The article substantiates approaches to the optimal management of innovative drilling tools, considering their design and technological features. This is based on an integrated analysis of equipment parameters, operating regimes, and geological conditions, which collectively ensures enhanced efficiency, reliability, and safety in well construction.*

*The research results demonstrated that the implementation of innovative devices for directional drilling and axial load control improves the accuracy of wellbore trajectory, enhances the stability and efficiency of rock destruction, optimizes axial and torsional loads, reduces drilling tool wear, and increases the rate of penetration. The potential for integrating these devices into automated drilling control systems for real-time adaptive optimization was identified.*

*The practical significance of this study lies in improving the efficiency and reliability of the drilling process through the use of innovative tools and their integration into automated control systems. This enables the optimization of operating modes, reduces equipment wear and costs, and ensures the precision and safety of well construction.*

**Key words:** directional drilling, axial load, innovative devices, optimal control, drilling equipment, automation, efficiency, trajectory stability.

### Література

1. Коровяка Є.А., Ігнатов А.О. Прогресивні технології спорудження свердловин. – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. 166 с.
2. Когутяк М.І, Лещій Р.М., Дранчук М.М., Шавранський М.В. Автоматизація неперервних технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості: Навчальний посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2015. .286 с.
3. 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.
4. Vaddadi, N. Introduction to oil well drilling. Bathos (U Vee Infosystems), 2015. 204 p.
5. Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Гапоненко А.А., Гапоненко І.А., Паранюк Д.І. Методи оптимізації процесу буріння свердловин./ Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 96–101.
6. Кропивницька В.Б. Цифрові підходи до автоматизації управління режимами буріння: адаптація, алгоритми, впровадження. *Методи та прилади контролю якості*. ІФНТУНГ, 2025 С. 109-120.
7. Nonlinear optimal control of the construction trajectory of a deep well / O. Andrusenko et al. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2025. N 114. P. 145–154.
8. Gu H., Wu Y., Li X., Hou Z. Research on wellbore trajectory optimization and drilling control based on the TD3 algorithm. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15, N 13. P. 7258.
9. Yi Z., Li Z., Yi M., Wang D., Cheng P. Intelligent Real-Time Risk Evaluation and Drilling Parameter Optimization for Enhanced Safety in Deep-Well Operations. *Processes*. 2025. Vol. 13, N 10. P. 3102.
10. Jebur A. Directional drilling tools assessment and the impact of bottom hole assembly configuration on the well trajectory and operation optimization: Master's thesis. Politecnico di Torino, 2020. 108 p.
11. Павличенко А.В., Коровяка Є.А., Ігнатов А.О. Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин. Дніпро: Журфонд, 2023. – 212 с.
12. Lyes, B. Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer, 2020. 250 p.
13. Hossain, M.E., Islam, M.R. Drilling engineering: problems and solutions. Wiley – Scrivener publishing, 2018. 627 p.
14. 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.
15. Pellet impact core drill. United States Patent, US 5671816. 30.09.1997.
16. Earth boring apparatus US 4589502. МПК E21D 1/06. 20.05.1986.
17. Пристрій для направленою буріння пат. 111351 Україна: МПК E21B7/08; опубл. 26.01.2015, бюл. № 2.

18. Пристрій для створення осевого навантаження пат. 114966 Україна: МПК E21B19/08; опубл. 10.05.2017, бюл. № 9.
19. Automatic well drilling apparatus. GB 954328 A. МПК E21B 19/08. 02.04.1964.
20. Telescopic drill rods for soil drilling equipments US 3517760 A, МПК E21B 17/02. 30.06.1970.

Надійшла 11.11.25

### References

1. Koroviaka, Ye.A. & Ihnatov, A.O. (2020). Prohresyvni tekhnolohii sporudzhennia sverdlodyn: monograph [Advanced well construction technologies]. Dnipro University of Technology [in Ukrainian].
2. Kohutiak, M.I., Leshchii, R.M., Dranchuk, M.M., Shavranskyi, M.V. (2015). *Avtomatyzatsiia neperervnykh tekhnolohichnykh protsesiv v naftovii ta hazovii promyslovosti [Automation of continuous technological processes in the oil and gas industry]*. Fakel [in Ukrainian].
3. Aziukovskyi, O.O., Koroviaka, Ye.A., Ihnatov, A.O. (2023). Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions. – Dnipro: Zhurfond.
4. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos (U Vee Infosystems).
5. Morkun, V.S., Morkun, N.V., Tron, V.V., et al. 2020. Metody optymizatsii protsesu burinnia sverdlodyn [Methods for optimizing the well drilling process]. *Mining herald*, 107, 96–101.
6. Kropyvnytska, V.B. (2025). Tsyfrovi pidkhody do avtomatyzatsii upravlinnia rezhymamy burinnia: adaptatsiia, alhorytmy, vprovadzhennia. [Digital approaches to automation of drilling mode control: adaptation, algorithms, implementation]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. (p. 109–120). IFNTUNH [in Ukrainian].
7. Andrusenko, O., Gaidaichuk, V., Kotenko, K., & Lazareva, M. (2025). Nonlinear optimal control of the construction trajectory of a deep well. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (114), 145–154.
8. Gu, H., Wu, Y., Li, X., & Hou, Z. (2025). Research on Wellbore Trajectory Optimization and Drilling Control Based on the TD3 Algorithm. *Applied Sciences*, 15(13), 7258.
9. Yi, Z., Li, Z., Yi, M., Wang, D., & Cheng, P. (2025). Intelligent Real-Time Risk Evaluation and Drilling Parameter Optimization for Enhanced Safety in Deep-Well Operations. *Processes*, 13(10), 3102.
10. Jebur, A. (2020). *Directional drilling tools assessment and the impact of bottom hole assembly configuration on the well trajectory and operation optimization* [Master's thesis]. Politecnico di Torino.
11. Pavlychenko, A.V., Koroviaka, Ye.A., Ihnatov, A.O. (2023). *Study of hydraulic principles of circulation of process fluids*. Zhurfond, – 212 p. [in Ukrainian].
12. Benyoucef, L. (2020). *Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation*. Springer International Publishing.
13. Hossain, M.E., & Islam, M.R. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Wiley – Scrivener publishing.
14. 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.
15. F.H. Deily. United States Patent 5671816, *Pellet impact core drill*, 30.09.1997.
16. Salter Martin de G. Hynd John G. S. *Earth boring apparatus* US 4589502. E21D 1/06. 20.05.1986.

17. Ihnatov A.O. (2015). Patent of Ukraine № 111351: МПК E21B7/08; *Prystrii dlia napravlenoho burinnia [Device for controlled drilling]* (Patent Ukrainy № 11351).
18. Ihnatov A.O. (2017). Patent of Ukraine № 114966: МПК E21B19/08; *Prystrii dlia stvorennia osovoho navantazhennia [Autumn load creation device]* (Patent Ukrainy № 114966).
19. Carter, Elbert P. *Automatic well drilling apparatus*. GB 954328 A. МПК E21B 19/08. 02.04.1964.
20. Kehrberger Achim. *Telescopic drill rods for soil drilling equipments*. US 3517760 A, МПК E21B 17/02. 30.06.1970.