

УДК 622.24

ПРОГРАМНЕ ТОРПЕДУВАННЯ СВЕРДЛОВИН З МЕТОЮ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХВАТІВ БУРОВИХ КОЛОН

Янютин Євген Григорович, докт. техн. наук, проф.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: e.yanutin@gmail.com, ORCID: 0009-0006-0325-6433

Горлов Ярослав Віталійович, студент ТП-43,
Харківський національний університет імені Василя Назаровича Каразіна
e-mail: yaroslav.gorlov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9864-9109

Воропай Олексій Валерійович, докт. техн. наук, проф. кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: voropay.alexey@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3396-8803

Шарапата Андрій Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.sharapata@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0823-9262

Єгоров Павло Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.egpavel@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6616-9966

Вступ

Сучасна стратегія видобутку корисних копалин та розвитку геотермальної енергетики пов'язана з інтенсивним поглибленням свердловин. У таких умовах будівництва об'єктів нафтогазового комплексу зростає ймовірність виникнення аварій, серед яких найбільш деструктивними є прихвати бурильних колон. Це головна причина простоїв, що складають до 15-20% від загального часу будівництва свердловин [1], які наносять бурильній галузі значні збитки. Ліквідація прихватів у глибоких свердловинах залишається однією з найскладніших інженерних задач, оскільки традиційні методи часто виявляються малоефективними. Саме тому розробка і покращення методів ліквідації прихватів є надзвичайно важливою для підвищення продуктивності і рентабельності бурильної галузі.

Один із традиційних способів ліквідації прихватів базується на створенні потужного одноразового імпульсу в певній зоні бурильної колони. Проте такий підхід забезпечує лише тимчасове розшарування контактної зони з меншими зазорами, не руйнуючи повністю зв'язки на всій ділянці прихвату. Фундаментальні дослідження вказують на можливість використання хвильових деформаційних процесів для керування механічною системою "бурильна колона – затрубне середовище". Зокрема, результати моделювання нестационарного імпульсного навантаження оболонок типу Тимошенка на пружній основі [2–4] дозволяють:

- забезпечити методологію ідентифікації імпульсних навантажень на елементи бурильних колон [2], що є важливим для прогнозування динамічної міцності бурильних труб;

- врахувати масово-інерційні характеристики в'язкопружних опор [3], які є вагомими для оптимізації компоновки бурильної колони та зменшення або збільшення її резонансних коливань;

- використати механізм керування нестационарними коливаннями [4], який може бути застосований для активного «розгойдування» прихопленої колони за допомогою додаткових динамічних навантажень.

Це може підвищити надійність бурильних інструментів та забезпечити покращення методів вивільнення інструменту, що важливо для ліквідації аварій. Проте перехід від теоретичних моделей оболонок до практичних алгоритмів керованого вибухового впливу в обмеженому просторі свердловини досі залишається недостатньо опрацьованим.

На способи ліквідації прихватів бурильних колон були отримані два авторських свідоцтва [5, 6]. Перше свідоцтво було надано Ловлі С. А. [5], який є автором ліквідації прихватів труб за допомогою підриву одного заряду, який на каротажному кабелі спускається на місце проти прихвату і після підриву якого відбувається процес розхожування бурильної колони. Друге свідоцтво було видано декільком авторам [6]. Воно видано за спосіб струшування прихопленої колони за допомогою підриву декількох зарядів в програмному режимі. Ці заряди спускаються на багатожильному каротажному кабелі і розміщуються спеціальним чином проти зони прихвату.

В роботі Левчук К. Г. [7], зокрема, приведено описання сучасних технічних засобів і технологій вивільнення прихоплених колон від прихватів. Ця робота містить в собі 230 посилань на статті і монографії, що присвячені темі буріння свердловин.

Останнім часом з'явилося багато публікацій [8–14], в яких автори визнають необхідність створення нових ефективних методів запобігання прихватам бурильного інструмента та використання сучасних технологій, зокрема машинного навчання та штучного інтелекту, для раннього виявлення ризиків появи прихватів шляхом постійного моніторингу і діагностики параметрів процесу буріння. В цих публікаціях дослідники зосереджуються на різних механізмах прихоплень, таких як враховують геометрію стовбура свердловини, відкладення шламу та ерозію стінок свердловини. Зокрема, у роботі [14] описується управління стабільністю стовбура під час буріння на родовищах з використанням сучасних методів. Чисельне моделювання у роботі [9] використовується для аналізу механізмів прихоплень, пов'язаних із відкладенням шламу при різних режимах буріння. Метод прогнозування коефіцієнта тертя бурильної колони зі стінками свердловини за допомогою графової мережі пропонується у роботі [10]. Модель прогнозування рідкісних подій прихоплення на основі прихованої марковської моделі розроблена у роботі [13].

Існуючі методи торпедування свердловин базуються на одноразовому вибуховому навантаженні, що забезпечує лише короткочасний руйнівний вплив на зв'язки колони з затрубним простором. Це обмеження мотивує розробку альтернативних підходів, здатних генерувати тривалі нестационарні коливальні процеси в бурильній колоні в її прихваченій зоні.

У даному дослідженні висувається гіпотеза, що перехід від одноразового імпульсу до «резонансно-подібної» моделі впливу – шляхом ініціювання серії послідовних вибухів із програмно заданими затримками – дозволить створити тривалу суперпозицію деформаційних та гідродинамічних хвиль. Це, у свою чергу, має забезпечити формування збільшеного і стабільного зазору між колоною та породою за рахунок підвищення амплітуди вимушених коливань стінок труб.

Мета дослідження

Мета дослідження роботи, що викладається тут, полягає у розробці математичної моделі та експериментальній валідації технології програмного торпедування, що використовує енергію імпульсних впливів на елементи конструкцій бурильних колон у вигляді керованої послідовності декількох підривів зарядів напроти місця прихвату для інтенсифікації вибухового деформування бурильних колон. Це повинно робитися під час одного спуску-підйому багатожильного каротажного кабелю, на якому закріплені вибухові заряди. Нестационарні коливання елементів бурильної колони і середовища навколотрубного простору повинні створити умови для повного звільнення від прихвату. Автори назвали цей підхід – програмним торпедуванням бурильного інструмента з метою його звільнення від прихватів.

Матеріали та методи

В основу дослідження покладено математичне моделювання нестационарного імпульсного внутрішнього навантаження круглих циліндричних оболонок Тимошенка, взаємодіючих із середовищем (сальником або обваленою породою), модельованим одно- та двосторонньою пружною основою. Бурильна труба моделюється як пружна циліндрична оболонка теорії Тимошенка. Розроблено декілька схем розташування зарядів залежно від типу прихвату, включаючи конфігурації для локальних прихватів, ймовірних зон прилипання бурильної колони до стінок свердловини або зон ймовірного обвалу порід. Для реалізації технології на аварійних свердловинах розроблений наземний електронний блок керування (рис. 1) у складі каротажної станції, що подає електричні імпульси до зарядів і забезпечує програмовані часові затримки між підривами до шести зарядів (діапазон затримок: 1 мс – кілька хвилин) на глибинах до 6 км.

Результати та обговорення

Аналіз числових результатів математичного моделювання демонструє, що програмне торпедування з оптимальними часовими затримками (відповідно до часу проходження згинальних деформаційних хвиль в матеріалі бурильних труб чи хвиль тиску у внутрішній рідині) ініціює суперпозицію хвильових процесів, що призводить до вимушених коливань стінок труб із значно більшими амплітудами та тривалістю порівняно з традиційним одновиховим методом. Моделювання підтверджує формування стійкого зазору між трубами та затрубним середовищем після послідовного підриву серії зарядів, тоді як одноразове навантаження, забезпечує лише тимчасове та значно менше розшарування. Програмний метод торпедування створює умови для резо-

нансно-подібного руйнування прихватів. Це дозволяє не просто «струснути» колону, а цілеспрямовано знизити коефіцієнт тертя в парі «метал–порода», що може бути вирішальним фактором при ліквідації прихватів.



Рисунок 1 – Електронний блок керування

Експериментальні випробування на стендовій свердловині (Горобцівська площа, Полтавська область, жовтень 1984 рік) підтвердили високу надійність вибухової системи при п'яти спуско-підйомних операціях і програмного підриву трьох торпед. Застосування на аварійній промисловій свердловині «Римаровська-1» (глибина прихвату більше за 4835 м, грудень 1984 рік) продемонструвало ефективність технології при ліквідації аварії шляхом роз'єднання (відгвинчування) колони у верхній зоні прихвату за допомогою послідовного підриву трьох торпед.

Пізніше за допомогою спеціалістів (з міста Дніпро) в галузі програмного підриву зарядів в залізородних шахтах, розроблені і створені два промислових зразки електронних блоків програмного торпедування свердловин, які були передані до Полтавської експедиції з геофізичних досліджень в свердловинах.

Висновки

Проведені теоретичні дослідження і практичні експерименти вказують на новизну і ефективність запропонованого підходу програмного торпедування як методу ліквідації прихватів на глибинах до 6 км. На відміну від традиційного одноразового вибуху, використання серії імпульсів із прецизійними затримками від 1 мс дозволяє вийти на режим резонансно-подібного руйнування адгезійних зв'язків через керовану суперпозицію вибухових хвиль. Математичне моделювання на основі циліндричних оболонок типу Тимошенка дозволило теоретично обґрунтувати механізм виникнення вимушених коливань стінок труб, що є ключем до створення керованого зазору між колоною та затрубною породою. Практичні результати на свердловині «Римаровська-1» (4835 м) та експерименти на Горобцівській площі довели надійність наземної системи керування через каротажний кабель, що забезпечує стабільну суперпозицію хвиль навіть у середовищах із високим гідростатичним тиском.

Запропонована методика відкриває перспективи для подальшого покращення боротьби з прихватами бурильних колон за допомогою використання енергії вибухових матеріалів.

Цікавим і перспективним є використання на цьому шляху теоретичних матеріалів, висвітлених в публікаціях [2–4], [15,16]. В публікаціях [2–4] розглядаються різні питання специфіки імпульсного деформування елементів конструкцій, якими можна моделювати частини бурильного обладнання. Теоретичні методики і підходи, розглянуті у роботі [15] досліджують фізичну поведінку гранульованого матеріалу при динамічному нагнітанні рідини в обмеженому просторі (кавітаційні та вихорові ефекти), що може дозволити посилити ударну хвилю на звільнення колони при вибуховому її навантаженні. Спираючись на методологічний підхід [16] в майбутньому, оцінка поведінки елементів обладнання під дією серії імпульсних навантажень при ліквідації прихвату повинна включати критерії надійності і довговічності та прогнози витрат на технічне обслуговування, щоб гарантувати, що процес ліквідації аварії не призведе до порушення структурної цілісності бурового обладнання.

Література

1. Орловський В. М., Білецький В. С., Сіренко В. І. Буріння нафтових і газових свердловин. Львів : Новий Світ-2000, 2024. 320 с.
2. Voropay A. et al. Identification of the pulse axisymmetric load acting on a composite cylindrical shell, inhomogeneous in length, made of different materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, no. 7 (116). P. 21–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253356>.
3. Voropay A. et al. Modeling a Viscoelastic Support Considering Its Mass-Inertial Characteristics During Non-Stationary Vibrations of the Beam. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. D8–D14. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).d2).
4. Yanyutin E., Voropay A. Controlling nonstationary vibrations of a plate by means of additional loads. *International Journal of Solids and Structures*. 2004. Vol. 41, no. 18. P. 4919–4926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.062>.
5. Спосіб ліквідації прихоплення колон і труб : пат. 109276 СРСР. / Ловля С. А. № 451234 ; заявл. 12.05.1953 ; опубл. 15.08.1953.
6. Спосіб ліквідації прихоплення бурильної колони : пат. 1295797 СРСР. / Воробйов Ю. С. та ін. № 3856789 ; заявл. 20.02.1985 ; опубл. 07.03.1987, Бюл. № 9.
7. Левчук К. Г. Технічні засоби та технології звільнення зачепленої металевої бурильної колони. *Металофізика та новітні технології*. 2018. Т. 40, № 1. С. 45–137.
8. Othman E. B. et al. Application of Machine Learning to Augment Wellbore Geometry-Related Stuck Pipe Risk Identification in Real Time. *Offshore Technology Conference*. 2022. P. D41S002R004. DOI: <https://doi.org/10.4043/31695-MS>.
9. Zhu N., Huang W., Gao D. Numerical analysis of the stuck pipe mechanism related to the cutting bed under various drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 208. 109783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109783>.
10. Liu M. et al. Inertial Effect of Drill Pipe Friction Trend and Early Warning of Stuck Pipe. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2024. P. D21S015R004. DOI: <https://doi.org/10.2118/220991-MS>.
11. Katzmann L., Arvalo P., Starostin A. Ensuring Wellbore and Equipment Integrity via Data-Driven Adaptive Limit Modeling for Pressure Management and Stuck Pipe Prevention. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. 2025. P. D31S121R009. DOI: <https://doi.org/10.2118/228981-MS>.

12. **Nautiyal A., Mishra A. K.** Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry. *Environment, Development and Sustainability*. 2025. Vol. 27. P. 24167–24193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02387-3>.
13. **D'Amicis S. et al.** Stuck pipe prediction from rare events in oil drilling operations. *Upstream Oil and Gas Technology*. 2023. Vol. 11. 100096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100096>.
14. **George J. G., Okonkwo O., Akinfolarin A.** Successful Management of Wellbore Stability to Mitigate Stuck Pipe Incidents in a Brownfield Development Drilling Campaign: A Case Study of a Land Well in the Niger Delta. *SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. 2025. P. D21S002R005. DOI: <https://doi.org/10.2118/228660-MS>.
15. **Rogovyi A. et al.** Reduction of Granular Material Losses in a Vortex Chamber Supercharger Drainage Channel. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V*. Cham : Springer International Publishing, 2022. P. 218–226.
16. **Andrenko P. et al.** Improving the Technical Level of Hydraulic Machines, Hydraulic Units and Hydraulic Devices using a Definitive Assessment Criterion at the Design Stage. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 24, no. 1. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2021.01.057>.

УДК 621.313

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИЗМАТИЧНИХ LiFePO₄ АКУМУЛЯТОРІВ НА ОСНОВІ ЗВОРотної ЗАДАЧІ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ

Плахотний Олександр Петрович, д. техн. наук, проф. каф. ЕТ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: o.plakhotny@chdtu.edu, ORCID ID 0000-0002-5045-6132

Йовченко Алла Василівна, канд. техн. наук, ст. викладач каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: a.yovchenko@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-7069-1092

Костьян Наталія Леонідівна, канд. техн. наук, доц. каф. АТЕ,

Черкаський державний технологічний університет,
e-mail: n.kostian@chdtu.edu.ua, ORCID ID 0000-0002-1599-4007

Для транспортних систем, що працюють у режимах частих пусків і зупинок, високих пікових навантажень та обмеженого часу безперервної роботи, характерним є застосування енергоефективних і компактних джерел живлення. До таких систем належать міський електричний транспорт (електробуси, тролейбуси з автономним ходом), складська та промислова техніка, автономні логістичні платформи, безпілотні наземні транспортні засоби, спеціалізована військова техніка та ін. При їх роботі виникають короткі робочі цикли з інтенсивними режимами навантаження, що зумовлює доцільність використання призматичних акумуляторних батарей (АКБ) з огляду на їхню компактність, відносно низьку вартість, ефективне використання внутрішнього об'єму та достатні енергетичні характеристики за умов невеликого запасу енергії.