

УДК 622.2

Василевський А.Л., студент гр. 185М-24-1**Науковий керівник: Судаков А.К.**, д.т.н., професор кафедри нафтогазової інженерії та буріння*(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)*

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН ТА ВИДОБУТКУ КОРИСНИХ КОПАЛИН НА АСТЕРОЇДАХ І ПЛАНЕТАХ

Освоєння Місяця передбачає вирішення низки інженерних проблем, пов'язаних із бурінням у реголіті в умовах постійного вакууму, низької гравітації та екстремальних температур. Традиційні механічні методи буріння в таких середовищах є малоефективними через швидке зношення інструменту, відсутність рідинного теплообміну та труднощі з видаленням шламу. Інноваційна ультразвукова кавітаційна бурова головка (УКБГ), розроблена в межах проекту LUNADRILL 1 програми SELENADRILL, реалізує буріння в замкнутому контурі із використанням надкритичного CO₂ або метанолу як бурового агенту. Це середовище виконує функції охолодження, транспорту уламків і підсилення кавітаційного ефекту. У надкритичному стані рідина має високу теплопровідність і низьку в'язкість, що робить її ефективним робочим середовищем.

Крім того, система передбачає резервний режим — газоплазмову кавітацію у вакуумі, яка активується при втраті герметичності. Завдяки цьому модуль здатен зберігати працездатність у широкому діапазоні умов, що робить технологію універсальною для Місяця, Планет та астероїдів.

Постановка проблеми. Основною проблемою для систем буріння на Місяці є забезпечення ефективного процесу руйнування гірських порід без втрати енергії через вакуумне середовище. Використання традиційного механічного контакту з породою призводить до перегріву і швидкого зносу твердосплавних елементів.

Розробка УКБГ спрямована на створення бурового інструменту нового покоління, який поєднує ультразвукову енергію, кавітаційні ефекти та керований замкнутий термодинамічний контур із надкритичними рідинами.

Обґрунтування інструменту. Основним елементом комплексу є ультразвукова-кавітаційна бурова головка (УКБГ), яка формує зону мікрокавітації за допомогою п'єзокерамічного або магнітострикційного перетворювача на частотах 20–40 кГц [4, с. 121].

Геометрія головки оптимізована для мінімізації енергетичних втрат у вакуумі або розрідженому середовищі.

УКБГ реалізує подвійний принцип буріння:

- у штатному режимі – буріння у замкнутому контурі надкритичного бурового агенту (CO₂ або метанол), який виконує охолодження, видалення уламків і підтримку кавітаційного процесу;

- у резервному режимі – при втраті герметичності або відмові системи циркуляції активується індукована газоплазмова кавітація, що генерує імпульсні хвилі руйнування без використання рідини.

Для підтримання стабільної роботи у будь-якому режимі в конструкцію інтегровано роторний вузол із твердосплавними сегментами, який забезпечує базове механічне зчеплення з породою у випадках низької ефективності кавітації. Така комбінація гарантує надійність і керованість процесу буріння в умовах Місяця.

Конструктивні особливості. Модуль LUNADRILL 1 має горизонтальну архітектуру, в якій бурова головка інтегрована в передній сегмент корпусу з власною системою циркуляції надкритичного агенту. Система включає:

- термостійку камеру для обігу надкритичної рідини;
- регенератор тепла з мікроканалами;
- ультразвуковий генератор із адаптивною частотною стабілізацією;
- роторний блок для механічного резерву.

Використання надкритичного CO₂/метанолу дозволяє утворити замкнений мікроконтур буріння, який не втрачає маси речовини в умовах вакууму, а також забезпечує регульований тепловідвід і акумуляцію тиску.

Технічні переваги

1. Енергоефективність — зниження питомих витрат енергії на 25–30 % у порівнянні з механічним бурінням.
2. Стійкість у вакуумі — робота без потреби у відкритій циркуляції бурового розчину.
3. Автономність — замкнутий контур забезпечує повторне використання робочої речовини.
4. Мінімальний знос — через безконтактне або напівконтактне руйнування породи.
5. Універсальність — можливість переходу з надкритичного на газоплазмовий режим у реальному часі.

Висновки. Розроблена концепція УКБГ демонструє технологічну можливість буріння у вакуумі із замкнутим контуром рідинного агента в надкритичному стані, що є принципово новим підходом до розробки місячних ресурсів і ресурсів астероїдів. Комбінація ультразвукової кавітації, механічного роторного резерву та газоплазмового режиму забезпечує технологічну адаптивність і універсальність системи.

Модуль LUNADRILL 1 може стати основою для створення програми автоматичних бурових комплексів у межах міжнародних програм дослідження Місяця (Artemis, Lunar Gateway, ESA BIC), що відкриває додаткові перспективи національних космічних інноваційних розробок України.

Список використаних джерел:

1. Nakamura, T., & Kato, M. *Drilling Challenges in Lunar Regolith: Review and Future Prospects*. Acta Astronautica, 2022, 195, 112–119. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.02.018
2. Chen, X., Liu, P., & Zhang, Y. *Thermophysical Behavior of Supercritical CO₂ in Closed Drilling Systems*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2023, 45–52. DOI: 10.1016/j.petrol.2023.112087
3. Li, J., & Su, D. *Structural Design of Deep Lunar Boreholes*. Planetary and Space Science, 2021, 204, 101–110. DOI: 10.1016/j.pss.2021.105282
4. Singh, R., & Zhang, H. *Ultrasonic Cavitation Drilling: Mechanisms and Performance*. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59, 120–129. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.09.014
5. Park, S., et al. *Energy Optimization in Ultrasonic Drilling under Supercritical Conditions*. Applied Thermal Engineering, 2024, 234, 88–93. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.121042
6. Zhang, L., & Zhao, Q. *Closed-Loop Fluid Systems for Extraterrestrial Drilling*. Acta Astronautica, 2023, 208, 33–40. DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.04.010
7. Фем'як Я. М., Чудик І. І., Судаков А. К., Якимечко Я. Я., Федик О. М. Практичне використання кавітаційних процесів у бурінні свердловин: Монографія. - Дрогобич: «Посвіт», 2021. 232 с.