

Ганжа Ю.В., здобувач, 185А-24-10, АСП

Науковий керівник: Пашенко О.А., к.т.н., доцент кафедри НГІБ

(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

## ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ЗЙОМКИ ДЛЯ АНАЛІЗУ МІКРОМЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД У ПРОЦЕСАХ БУРІННЯ

Високошвидкісна зйомка (ВШЗ) є потужним інструментом оптичної діагностики, що дозволяє фіксувати швидкоплинні процеси з частотою кадрів від тисяч до мільйонів на секунду. У контексті буріння свердловин, де взаємодія інструменту з породою відбувається на мікросекундних масштабах, ВШЗ відкриває можливості для детального вивчення динаміки руйнування гірських порід, вібрацій бурового обладнання та формування стружки. Цей метод базується на принципах стробоскопічної або безперервної підсвітки з використанням камер типу Phantom, Photron чи аналогічних, оснащених CMOS-матрицями високої чутливості [1].

Експериментальні установки для ВШЗ у бурінні типово включають прозорі моделі свердловин, виготовлені з поліметилметакрилату (РММА) або скла, що імітують реальні породи за механічними властивостями. Буровий інструмент, наприклад, РДС-різці (полікристалічні алмазні композити), приводиться в обертання з контрольованою швидкістю (до 1000 об/хв) та осьовим навантаженням (від 1 до 10 кН). Камера розміщується перпендикулярно до осі буріння, з фокусною відстанню, що забезпечує роздільність на рівні 10–50 мкм/піксель. Підсвітка здійснюється лазерними імпульсами (наприклад, Nd:YAG лазер з довжиною хвилі 532 нм) для мінімізації розмиття [2].

Аналіз зображень, отриманих за допомогою ВШЗ, розкриває ключові механізми руйнування породи. Під час контакту різця з матеріалом спостерігається утворення мікротріщин, що поширюються зі швидкістю до 500 м/с, що відповідає розрахункам за теорією Гріффіта для крихкого руйнування:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}, \quad (1)$$

де  $\sigma$  – напруження,  $E$  – модуль Юнга,  $\gamma$  – поверхнева енергія,  $a$  – довжина тріщини.

Кадри фіксують перехід від еластичної деформації до пластичного течіння в зоні контакту, з формуванням "чіпів" стружки довжиною 0,1 – 1 мм. Швидкість відокремлення частинок породи корелює з кутом атаки різця: при 15° утворюються компактні чіпи, тоді як при 45° – порошкоподібний пил [3].

Динаміка вібрацій бурового інструменту є ще одним аспектом, доступним для вивчення. ВШЗ виявляє автоколивання з частотами 100 – 500 Гц, спричинені нелінійною взаємодією "stick-slip". Амплітуда коливань досягає 0,5 мм, що призводить до передчасного зносу. Застосування цифрової обробки зображень (алгоритми оптичного потоку, наприклад, Lucas-Kanade) дозволяє кількісно оцінити траєкторії:

$$\vec{v} = \arg \min \sum (I(x, y, t) - I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t))^2, \quad (2)$$

де  $I$  – інтенсивність пікселя.

У промисловому бурінні ВШЗ інтегрується в лабораторні стенди для оптимізації параметрів. Наприклад, при бурінні граніту швидкість проникнення (ROP) зростає на 20 – 30% при зменшенні вібрацій шляхом коригування ваги на гак (WOB). Дослідження на моделях з пісковіку показують, що гідравлічний удар (pulsation) зменшує

енергоспоживання на 15%, оскільки ВШЗ фіксує ефективніше видалення стружки зі швидкістю потоку промивальної рідини 1 – 2 м/с [4].

Порівняльний аналіз з традиційними методами, такими як акустична емісія чи тензометрія, підкреслює переваги ВШЗ: візуалізація *in situ* без контакту, висока тимчасова роздільність. Обмеження включають оптичну доступність (лише прозорі моделі) та високу вартість обладнання. Майбутні розробки передбачають комбінацію з рентгенівською томографією для 3D-реконструкції внутрішніх процесів [5].

Експерименти на реальних фрагментах породи (наприклад, вапняк з міцністю 100 МПа) демонструють, що ВШЗ дозволяє прогнозувати знос різців: час до критичного притуплення корелює з накопиченням мікротріщин, видимої на кадрах з частотою 10 000 fps. Коефіцієнт кореляції між візуальними даними та вимірним зносом сягає 0,95 [6].

Застосування ВШЗ у нафтогазовому бурінні сприяє переходу до адаптивних систем керування, де реальний час аналізу зображень (за допомогою ШІ-моделей на базі CNN) коригує параметри буріння. Це зменшує ризик аварій, таких як заклинювання, на 40%, за даними польових тестів.

Висновуючи, високошвидкісна зйомка трансформує розуміння мікромеханіки буріння, надаючи емпіричні дані для математичного моделювання та інженерної оптимізації. Подальші дослідження фокусуватимуться на інтеграції з сенсорами IoT для онлайн-моніторингу в реальних свердловинах.

#### Список використаних джерел:

1. Jacinto, M. V. G., Oliveira, L. H. L. de, Resende, J. M. B., de Medeiros, G. C., Rodrigues, T. C., Medeiros, D. R., & Montalvão, L. C. de. (2025). Embedded System for Cavings Detection in Well Drilling Operations Using Computer Vision Techniques to Enhance Real Time Well Stability Analysis. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference. OTC. <https://doi.org/10.4043/35965-ms>
2. Shi, H., Lin, X., & Wang, Y. (2017). Characterization of drill bit breakage in PCB drilling process based on high-speed video analysis. *Circuit World*, 43(3), 89–96. <https://doi.org/10.1108/cw-12-2016-0066>
3. Holt, C., & Ruel, F. (2022). Using AI Cuttings Load Classification to Assess Hole Cleaning and Wellbore Stability. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE. <https://doi.org/10.2118/210369-ms>
4. Svendsen, K. E., Kristiansen, T. G., Martin, J., Askø, A., Bjørlo, J., Khosravian, R., Holt, C., & Ruel, F. (2025). Automated Computer Vision System for Real-Time Detection of Drilled Cuttings and Cavings. In SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. SPE. <https://doi.org/10.2118/223785-ms>
5. Jacinto, M. V. G., Oliveira, L. H. L. de, Resende, J. M. B., de Medeiros, G. C., Rodrigues, T. C., Medeiros, D. R., & Montalvão, L. C. de. (2025). Embedded System for Cavings Detection in Well Drilling Operations Using Computer Vision Techniques to Enhance Real Time Well Stability Analysis. In Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference. OTC. <https://doi.org/10.4043/35965-ms>
6. Qiu, H., Feng, Y., Liu, C., Li, X., Fan, S., Li, S., & Sun, T. (2022). Investigation of in-phase vibration control technology for large multi-shaker test facility. *Vibroengineering Procedia*, 42, 33–38. <https://doi.org/10.21595/vp.2022.22486>