

22. Smith, J., & Lee, A. (2023). Polylactic acid as biobased binder for the production of 3D printing feedstock. *Journal of Materials Processing Technology*, 312, 117892.
23. Wang, X., Chen, Y., & Zhang, L. (2021). Polylactic acid (PLA) biocomposite: Processing, additive manufacturing, and applications. *Polymers*, 13(8), 1326.

УДК 622.248.33

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-39-46

А. К. Судаков¹, А. Ю. Дреус², доктори технічних наук, **М.А. Дригола¹**, аспірант

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, E-mail: sudakov@ukr.net, Dryhola.Ma.A@ntu.one

²Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, пр. Науки, 72, 49045, м. Дніпро, E-mail: dreus.andrii@gmail.com

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ЛІКВІДАЦІЇ ПОГЛИНАННЯ ПРОМИВКОВОЇ РІДИНИ ПРИ БУДІВНИЦТВІ СВЕРДЛОВИН

Метою роботи є підвищення ефективності ізоляційних робіт за рахунок застосування термопластичних сумішей при ліквідації поглинань промивальної рідини у свердловинах при їх спорудженні. Поставлені завдання вирішували комплексним методом дослідження, що включає аналіз і узагальнення літературних і патентних джерел, проведення аналітичних, експериментальних досліджень.

У роботі отримала подальший розвиток теорія ліквідації поглинання технологічних рідин спорудженні свердловин. У роботі обґрунтовано послідовність технологічних операцій при ліквідації поглинання промивальної рідини у стовбурі свердловин. Показано перспективність використання запропонованих підходів для створення нових технологічних рішень.

Одержані результати створюють основу для розробки більш прогресивних технологій ліквідації зон поглинання свердловинної рідини; розробки нових матеріалів з використанням явищ фазового переходу тампонажного матеріалу; виробництва нових тампонажних термопластичних матеріалів; розробки технологічного регламенту ізоляції поглинаючих горизонтів.

Ключові слова: буріння свердловин, промивальна рідина, поглинання, тампонажні матеріали, розплав.

Постановка проблеми

Процес буріння свердловин пов'язаний із геологічними ускладненнями. Одним з найпоширеніших ускладнень є поглинання промивної рідини. На ліквідацію поглинань витрачається значна частка часу та коштів, що витрачаються на спорудження свердловини [1, 2].

Найбільш поширеним методом ізоляції поглинаючих горизонтів є заповнення каналів поглинання тампонажним розчином. Такий розчин з часом повинен тверднути з утворенням тампонажного каменю або загустити і зміцнутися, залишаючись в'язко-пластичною системою. В результаті навколо свердловини створюється водонепроникна оболонка, яка має бути стійкою до перепаду тисків системи «пласт-свердловина» при виконанні різних технологічних операцій [3, 4].

Оскільки розрахунок технологічних параметрів даної технології неможливо здійснити існуючими методиками, у роботі наведено комплекс досліджень зі створення ізоляційної оболонки з легкоплавких тампонажних матеріалів.

Метою роботи є підвищення ефективності ізоляційних робіт за рахунок застосування термопластичних сумішей при ліквідації поглинань промивальної рідини у свердловинах при їх спорудженні.

Виклад основного матеріалу

Склад робіт. У комплексі робіт із проектування ізоляції поглинаючого горизонту термопластичним матеріалом із застосуванням вибійних теплових джерел необхідно виділення наступних етапів [5, 6]:

- збір та обробка геологічної інформації щодо характеру тріщинуватості, пластового тиску, місця розташування, інтенсивності поглинання поглинаючих пластів;
- розрахунок необхідних розмірів ізоляційної оболонки та обсягу розплаву термопластичного матеріалу;
- вибір типу термопластичного матеріалу та можливих добавок до нього;
- розрахунок режиму електротеплової обробки зони поглинання та вибір потужності теплового джерела контактного типу.

Розрахунок геометричних розмірів ізоляційної оболонки. Після завершення ізоляції поглинаючого горизонту навколо свердловини у зоні ускладнення (рис. 1) має утворитися непроникна оболонка (завіса), яка буде знаходитися під впливом тиску з

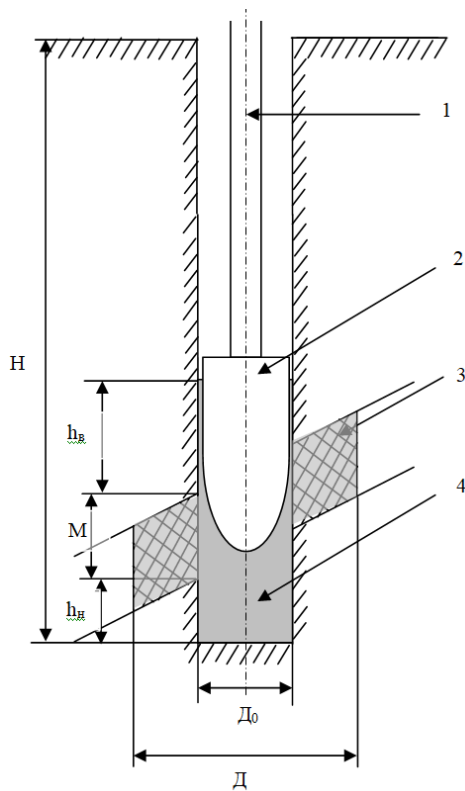


Рис. 1. Схема процесу тампонування поглинаючих горизонтів термопластичними матеріалами: 1 – колона бурових труб; 2 – вибійне теплове джерело контактної дії; 3 – поглинаючий горизонт; 4 – тампонажний матеріал

пласта і свердловини. З боку свердловини на оболонку діє тиск стовпа промивної рідини, який має пульсуючий характер (спуско-підйомні операції, запуск і зупинка насоса та ін.). З боку пласта на цю оболонку діє пластовий тиск, який є більш стабільний. Таким чином, ізоляційну оболонку можна розглядати як порожнистий циліндр, що знаходиться під тиском, і напругу на поверхні можна визначити за формулою Ляме:

$$\delta = \frac{2R^2(P_1 - P_2)}{R^2 - R_0^2} \leq [\delta] \quad (1)$$

де δ і $[\delta]$ – відповідно розрахункова та допустима напруга; R_0 і R – радіус свердловини та зовнішній радіус ізоляційної оболонки; P_1 і P_2 – відповідно гідростатичний тиск стовпа промивної рідини в свердловині та пластовий тиск.

Для визначення R можливі два випадки:

а) $P_1 > P_2$

$$R = R_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2(P_1 - P_2)}{[\delta_p]}}}; \quad (2)$$

б) $P_1 < P_2$

$$R = R_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2(P_2 - P_1)}{[\delta_{сж}]}}}; \quad (3)$$

де $[\delta_p]$ – допустима напруга тампонажного каменю на розтяг; $[\delta_{сж}]$ – відповідно допустима напруга на стискання.

Об'єм розплаву термопластичного матеріалу V , визначається виходячи з геометричних розмірів оболонки та шпаруватості пласта

$$V = 0,785[(D^2 - D_0^2)M\alpha + D_0^2(M + h_n + h_v)K_k]; \quad (4)$$

де D , D_0 – відповідно діаметри оболонки та свердловини; M – потужність поглинаючого горизонту, м; α – шпаруватість поглинаючого горизонту; h_n – величина, що враховує заповнення свердловини розплавом нижче за зону поглинання ($h_n = 1-2$ м); h_b – величина, що враховує необхідність заповнення розплавом свердловини вище зони поглинання ($h = 2-3$ м); K_k – коефіцієнт, що враховує наявність каверн у свердловині, ($K_k = 1,2-1,3$ м) [7, 8].

Маса термопластичного матеріалу m_2 визначається за формулою

$$m_2 = V\rho_2, \quad (5)$$

де ρ_2 – щільність матеріалу.

Вибір типу термопластичного матеріалу. Як тампонажні термопластичні матеріали (ТПМ) до цього часу використовувалися різні полімери і мономери, що відносяться до групи термопластів [9, 10]. Термопласти характеризуються тим, що можуть розплавлятися при нагріванні і знову тверднути при охолодженні. Цей процес може повторюватися багаторазово, якщо нагрівання не перевищує межі, при якій полімер розкладається.

До цього часу у промислових масштабах як ТПМ застосовувалися лише нафтові бітуми. До основних недоліків бітуму, як тампонажного матеріалу, відноситься його здатність релаксувати в часі. При перепаді тиску 0,3–0,5 МПа він здатний текти навіть при температурі +15 °С. Розплав бітуму має щільність близьку до щільності води і в середовищі промивної рідини здатний розшаровуватися. Бітум погано розбурюється і здатний забруднювати буровий інструмент. Відомі дані про його канцерогенність та шкідливий вплив на навколишнє середовище. Через ці та інші недоліки, бітуми не знайшли широкого застосування як тампонажний матеріал.

З метою усунення недоліків, властивих сумішам на бітумній основі, у НТУ «Дніпровська політехніка» під керівництвом О.М. Бражененко [11, 12] та Ю.Л. Кузіна виконані роботи з розробки принципово нових нетрадиційних технологій тампонування поглинаючих горизонтів [13].

Відмінною особливістю запропонованих технологій є те, що ТПМ з низькою температурою плавлення доставляється в зону ускладнення в твердому гранульованому вигляді, де нагрівається до рідкого стану вибійним тепловим джерелом, з подальшим його зачавлюванням у шпаристий простір поглинаючого або нестійкого горизонту.

У першому випадку [14] як ТПМ запропоновано застосування сірки, яка має низку переваг. Сірка хімічно інертна, на неї руйнівню не діють агресивні води. Сірка легко розбурюється та не налипає на технологічний інструмент. Термін зберігання гранульованої сірки не впливає на її фізико-механічні властивості. Вартість сірки приблизно рівна вартості цементу і набагато менша від вартості синтетичних смол. Завдяки низькій в'язкості розплаву як чистої сірки, так і сірки з добавками пластифікаторів, вона може легко проникати в гірські породи з незначним розкриттям тріщин. Крихкість сірки може бути усунена за рахунок добавки пластифікаторів. Міцність тампонажного каменю, отриманого при охолодженні розплаву сірки, можна порівняти з міцністю цементного каменю, причому в ранній стадії твердіння міцність сірки на порядок вище міцності на одновісне стиснення цементного каменю. Температура плавлення тампонажного термопластичного матеріалу можна регулювати введенням пластифікаторів.

У другому випадку [15] як ТПМ запропоновано органічні в'язучі на основі синтетичних термопластів, які дозволяють отримати міцне та недороге безтрубне кріплення. Поліетилен та поліпропілен не мають екологічних протипоказань при кріпленні та проведенні ізоляційних робіт у свердловині. Гранульовані композиційні склади з органічною матрицею та мінеральними наповнювачами відповідають умовам екологічно чистого безтрубного кріплення та ізоляції ускладнених інтервалів свердловин.

Розроблені тампонажні матеріали при твердінні не дають усадки з утворенням тріщин, не розтікаються в тріщинах, мають хорошу зчеплюваність з гірськими породами, стійкі до

впливу вод і перепадів тисків. Крім того, ці в'язучі речовини однокомпонентні, технологічні при доставці в зону тампонування, легко розбурюються і не налипають на буровий інструмент. Мають щільність вище за щільність бурового розчину.

Розрахунок параметрів електронагріву зони ускладнення. Для забезпечення повного розплавлення всієї маси термопластичного матеріалу в зоні ускладнення, необхідно нагріти свердловинну рідину до температури T_1 , яка дозволить розплавити ТПМ.

Ця температура визначається за формулою

$$T_1 = \frac{c_1 m_1 T_3 + c_2 m_2 (T_3 - T_2) + \lambda m_2}{c_1 m_1}; \quad (6)$$

де λ – питома теплота плавлення термопластичного матеріалу; m_1 – маса свердловинної рідини; c_1, c_2 – питома теплоємність свердловинної рідини та термопластичного матеріалу відповідно; T_2 – температура свердловинної рідини у зоні поглинаючого горизонту.

В результаті після розплавлення термопластичного матеріалу в свердловині встановиться повна теплова рівновага з температурою рідини свердловинної T_3 .

Якщо прийняти обсяг свердловинної рідини, що нагрівається, рівним об'єму розплаву термопластичного матеріалу, то маса рідини, що нагрівається m_1 , дорівнює

$$m_1 = V \rho_1; \quad (7)$$

де ρ_1 – щільність свердловинної рідини.

Знаючи температуру T_1 і задавшись потужністю електронагрівача, визначають тривалість прогріву зони ускладнення з рис. 2.

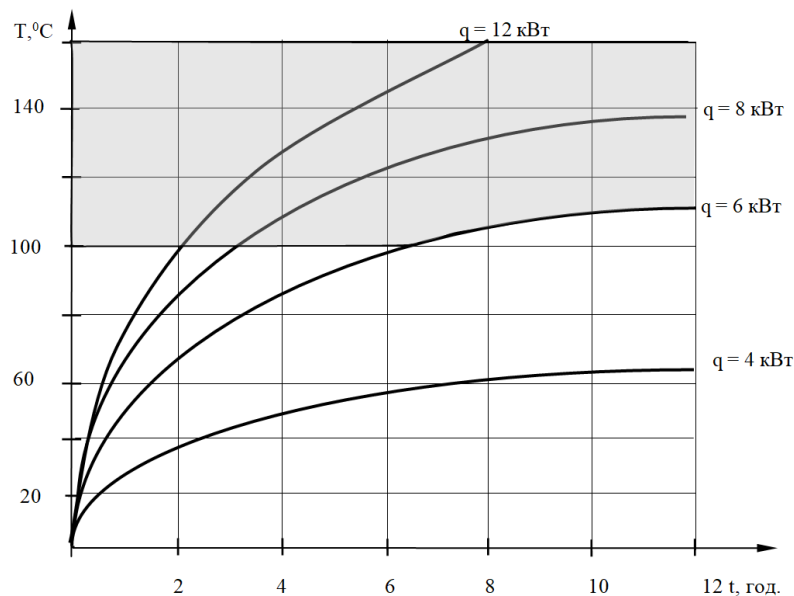


Рис. 2. Залежність температури нагрівання бурового розчину в зоні теплового джерела контактної дії від часу нагрівання в свердловині діаметром 76 мм

Залежності, що наведені на рис. 2, отримані авторами у результаті свердловинних досліджень процесу нагріву промивальної рідини вибійним електронагрівачем в умовах бурового полігону кафедри, а також у результаті свердловинних досліджень технології ліквідації поглинання промивальної рідини в умовах Геологорозвідувальної експедиції №37 ДГП «КІРОВГЕОЛОГІЯ».

Висновки

Для успішної боротьби з поглинаннями рідини для промивання повинен вирішуватися ряд питань: вивчення проникного горизонту, його оцінка, вибір способу боротьби з поглинаннями, реалізація прийнятого способу, контроль робіт.

Як тампонажний термопластичний матеріал рекомендується застосовувати однокомпонентні тампонажні матеріали не на водній основі.

Температура нагрівання термопластичного матеріалу в свердловині має бути 140–180 °С.

A. Sudakov¹, A. Dreus², M. Dryhola¹

¹Dnipro University Technology, Ukraine

²Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

DESIGN METHODOLOGY FOR ELIMINATING ABSORPTION OF FLUSHING FLUID IN WELL CONSTRUCTION

The objective of this work is to enhance the efficiency of zonal isolation operations through the application of thermoplastic mixtures for mitigating drilling fluid losses (lost circulation) during well construction. The outlined tasks were addressed using a comprehensive research methodology, which included the analysis and synthesis of literary and patent sources, alongside analytical modeling and experimental studies.

This research further advances the theory of mitigating lost circulation during well construction. It provides a substantiated sequence of technological operations for eliminating drilling fluid losses in the wellbore. The prospective utility of the proposed approaches for developing novel technological solutions is demonstrated.

The obtained results establish a foundation for: 1) developing more advanced technologies for sealing off lost-circulation zones; 2) designing new materials utilizing phase transition phenomena of the sealing compound; 3) manufacturing novel thermoplastic sealing materials; 4) formulating a technical specification for the isolation of thief zones.

Key words: well drilling, drilling fluid, loss circulation, plugging materials, thermoplastic melt.

Література

1. Судаков А. К., Дзюбик А. Р., Кузін Ю. Л., Назар І. Б., Судакова Д. А. Ізоляція поглинаючих горизонтів бурових свердловин термопластичними матеріалами. Дрогобич: Просвіт, 2019. 182 с.
2. Ставичний Є. М. Розроблення тампонажних систем для цементування хомогенних відкладів у свердловинах родовищ Дніпровсько–Донецької Западни: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. Івано–Франківськ, 2016. 26 с.
3. Судакова Д. А. Обґрунтування параметрів технології ізоляції поглинаючих горизонтів бурових свердловин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. Івано–Франківськ, 2018. 20 с.
4. Гриманюк В. І. Розроблення армованого тампонажного матеріалу для цементування свердловин (на прикладі родовищ Північно–Західного шельфу Чорного моря): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. Івано–Франківськ, 2014. 22 с.
5. Ставичний Є. М. Розроблення тампонажних систем для цементування хомогенних відкладів у свердловинах родовищ Дніпровсько–Донецької западини: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.10. Івано–Франківськ, 2015. 198 с.
6. Sudakov A.K., Khomenko O.Ye., Isakova M. L., Sudakova D.A. Concept of numerical experiment of isolation of absorptive horizons by thermoplastic materials. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. N 5(155). P. 12–16.
7. Sudakov A.K., Dreus A.Yu., Khomenko O.Ye., Sudakova D.A. Analytical study of heat transfer in absorptive horizons of borehole at forming cryogenic protecting of the plugging material. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. N 3(159). P. 32–46.

8. Sudakov A., Dreus A., Ratov B., Delikesheva D. Theoretical bases of isolation technology for swallowing horizons using thermoplastic materials. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2018. N 2 (428). P. 72–80.
9. Sudakov A., Dreus A., Sudakova D., Khamininch O. The study of melting process of the new plugging material at thermomechanical isolation technology of permeable horizons of mine opening. *E3S Web of Conferences*. 2018. N 60. P. 1–10.
10. Sudakov A., Dreus A., Kuzin Y., Sudakova D., Ratov B., Khomenko O. A thermomechanical technology of borehole wall isolation using a thermoplastic composite material. *E3S Web of Conferences*. 2019. N 109. 00098.
11. Sudakov A., Chudyk I., Sudakova D., Dziubyk L. Innovative isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials. *E3S Web of Conferences*. 2019. N 123. 1–10.
12. Sudakov A., Dreus A., Ratov B., Sudakova O., Khomenko O., Dziuba S., Sudakova D., Muratova S., Ayazbay M. Substantiation of thermomechanical technology parameters of absorbing levels isolation of the boreholes. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*. 2020. N 2(440). P. 63–71.
13. Kuzin J., Mostinets O., Sudakova D., Isakova M. Isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials on the basis of polyethyleneterephthalate. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. N 1(157). P. 34–39.
14. Судаков А.К., Мартиненко І.І., Судакова Д.А. Наукова школа Б.А.М. – покоління учнів та інноваційних технологій. *Породоруйнівний та металообробний інструмент – техніка та технологія його виготовлення та застосування*. Зб. наук. праць. Вип. 22. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2019. С. 12–24.
15. Судаков А.К., Судакова Д.А. Ізоляція поглинаючих горизонтів бурових свердловин термопластичними матеріалами. *Породоруйнівний та металообробний інструмент – техніка та технологія його виготовлення та застосування*. Зб. наук. праць. Вип. 22. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2019. С. 115–126.

Надійшла 26.08.25

References

1. Sudakov, A. K., Dziubyk, A. R., Kuzin, Yu. L., et al. (2019). *Izoliatsiia pohlynaiuchykh horyzontiv burovykh sverdlovyh termoplastychnymy materialamy [Insulation of absorbing horizons of boreholes with thermoplastic materials]*. Prosvit (in Ukrainian).
2. Stavychnyi, Ye. M. (2016). *Rozroblennia tamponazhnykh system dlia tsementuvannia khemohennykh vidkladiv u sverdlovykh rodovyshch Dniprovsko–Donetskoi Zapadyny [Development of cementing systems for cementing chemogenic deposits in wells of the Dnieper-Donetsk Basin deposits]*. [Extended abstract of candidate's thesis]. Ivano–Frankivsk (in Ukrainian).
3. Sudakova, D. A. (2018). *Obhruntuvannia parametriv tekhnologii izoliatsii pohlynaiuchykh horyzontiv burovykh sverdlovyh [Substantiation of parameters of technology insulation of absorbing horizons of boreholes]*. [Extended abstract of candidate's thesis]. Ivano–Frankivsk (in Ukrainian).
4. Hrymaniuk, V. I. (2014). *Rozroblennia armovanoho tamponazhnoho materialu dlia tsementuvannia sverdlovyh (na prykladi rodovyshch Pivnichno–Zakhidnoho shelfu Chornoho moria) [Development of reinforced cementing material for well cementing (using*

- the example of deposits on the North-Western shelf of the Black Sea*]. [Extended abstract of candidate's thesis]. Ivano–Frankivsk (in Ukrainian).
5. Stavychnyi, Ye. M. (2015). *Rozroblennia tamponazhnykh system dlia tsementuvannia khemohennykh vidkladiv u sverdlovynakh rodovyshch Dniprovsko–Donetskoï zapadyny* [Development of cementing systems for cementing chemogenic deposits in wells of the Dnieper–Donetsk Basin deposits]. [Candidate's dissertation]. Ivano–Frankivsk (in Ukrainian).
 6. Sudakov, A.K., Khomenko, O.Ye., Isakova, M. L., Sudakova, D.A. (2016). Concept of numerical experiment of isolation of absorptive horizons by thermoplastic materials. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of the National Mining University*, (5), 12–16.
 7. Sudakov, A.K., Dreus, A.Yu., Khomenko, O.Ye., Sudakova, D.A. (2017). Analytical study of heat transfer in absorptive horizons of borehole at forming cryogenic protecting of the plugging material. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of the National Mining University*, (3), 32–46.
 8. Sudakov, A., Dreus, A., Ratov, B., Delikesheva, D. (2018). Theoretical bases of isolation technology for swallowing horizons using thermoplastic materials. *News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*, (2), 72–80.
 9. Sudakov, A., Dreus, A., Sudakova, D., Khamininch, O. (2018). The study of melting process of the new plugging material at thermomechanical isolation technology of permeable horizons of mine opening. *E3S Web of Conferences*, (60), 1–10. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000027>.
 10. Sudakov, A., Dreus, A., Kuzin, Y., et al. (2019). A thermomechanical technology of borehole wall isolation using a thermoplastic composite material. *E3S Web of Conferences*, (109), 00098.
 11. Sudakov, A., Chudyk, I., Sudakova, D., Dziubyk, L. (2019). Innovative isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials. *E3S Web of Conferences*, (123), 1–10.
 12. Sudakov, A., Dreus, A., Ratov, B., et al. (2020). Substantiation of thermomechanical technology parameters of absorbing levels isolation of the boreholes. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences*, (2), 63–71.
 13. Kuzin, J., Mostinets, O., Sudakova, D., Isakova, M. (2017). Isolation technology for swallowing zones by thermoplastic materials on the basis of polyethyleneterephthalate. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – Scientific Bulletin of the National Mining University*, (1), 34–39.
 14. Sudakov, A.K., Martynenko, I.I., Sudakova, D.A. (2019). Naukova shkola B.A.M. – pokolinnia uchniv ta innovatsiinykh tekhnolohii [The scientific school of B.A.M. – generations of students and innovative technologies]. *Porodorazrushiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnolohiia ego izhotovleniia s primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications* (22nd Issue, p. 12–24). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy (in Ukrainian).
 15. Sudakov, A.K., Sudakova, D.A. (2019). Izoliatsiia pohlynaiuchykh horyzontiv burovykh sverdlovn termoplastychnymy materialamy [Insulation of clay horizons of drill holes with thermoplastic materials]. *Porodorazrushiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnolohiia ego izhotovleniia s primeneniia – Rock Destruction and Metal-*

Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications
(22nd Issue, p. 115–126). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy (in Ukrainian).

УДК 622.24:004.89

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-46-54

O. A. Pashchenko, V. O. Rastsvietaiev, Candidates of Technical Sciences, **A. S. Shumov**,
Ph.D Student, **O. O. Dmytruk, V. V. Yavorska**

*Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, 49005, Ukraine,
e-mail: rastsvietaiev.v.o@nmu.one*

AUTOMATION OF DRILLING EQUIPMENT MONITORING AND DIAGNOSTICS USING IOT TECHNOLOGY

The rapid evolution of the oil and gas industry necessitates advanced solutions to enhance the reliability, efficiency, and safety of drilling operations. Traditional monitoring and diagnostics of drilling equipment, reliant on manual inspections and scheduled maintenance, suffer from inefficiencies, delayed fault detection, and high operational costs. This study explores the application of Internet of Things (IoT) technology to automate the monitoring and diagnostics of drilling equipment, addressing these challenges through real-time data acquisition and advanced analytics. The proposed IoT framework integrates sensors (e.g., vibration, temperature, pressure), lightweight communication protocols such as MQTT and CoAP, and cloud-based platforms like AWS IoT for data storage and processing. A case study was conducted on a simulated drilling rig, collecting 1.2 million data points over 30 days to evaluate system performance. Machine learning models, including Random Forest classifiers and LSTM networks, were employed for fault detection and predictive maintenance, achieving a precision of 0.92, recall of 0.89, and F1-score of 0.90 in identifying anomalies such as bearing wear and pump pressure issues. The IoT system reduced unplanned downtime by 18% and maintenance costs by 15% compared to traditional methods, with edge-based anomaly detection averaging 150 ms and cloud-based diagnostics at 1.2 seconds. Challenges include network reliability, with 5% packet loss in low-connectivity scenarios, data security requiring robust encryption, and integration with legacy systems necessitating custom middleware in 30% of cases. The system improved operational safety by early fault detection and reduced energy consumption by 12%, contributing to environmental sustainability. Comparative analysis with traditional methods underscores the IoT system's superior accuracy and efficiency, driven by real-time data and predictive analytics. Future research should focus on integrating advanced AI, such as deep reinforcement learning, and edge computing to enhance system responsiveness and scalability to other industrial applications. Recommendations for industry adoption include using standardized protocols, investing in reliable networks, and training personnel for effective IoT implementation. This study demonstrates that IoT technology offers a transformative approach to drilling equipment management, with significant implications for operational efficiency, safety, and sustainability, provided challenges like network reliability and system integration are addressed.

Key words: *Internet of Things (IoT), drilling equipment, predictive maintenance, fault detection, machine learning, real-time monitoring, operational efficiency, data analytics, network reliability, industrial automation.*

Introduction

Drilling operations in the oil and gas industry are critical to global energy production, requiring robust systems to ensure equipment reliability and operational efficiency [1]. Effective monitoring and diagnostics of drilling equipment are essential to minimize downtime, reduce maintenance costs, and enhance safety [2]. However, traditional monitoring methods often rely on manual inspections and scheduled maintenance, which are labor-intensive, prone to human error, and limited in their ability to detect faults in real time [3]. These approaches frequently result in unexpected equipment failures,