



Прийнято 11.11.2025. Прорецензовано 02.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 622.24.053.3:539.62

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-53-64

УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРТЯ БУРИЛЬНОГО ЗАМКА ОБ ПОРОДУ

Слабий О. О. *

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0002-1274-2875>
e-mail: burewisnyk@gmail.com

Гриджук Я. С.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0002-1429-8640>
e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com

Джус А. П.

Доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0002-2660-5134>
e-mail: andrii.dzhus@nung.edu.ua

Михайлюк В. В.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0002-3329-2068>
e-mail: myhajlyukv@ukr.net

Матвієнків О. М.

Кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
<https://orcid.org/0000-0003-1717-5416>
e-mail: oleh.matviienkiv@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Слабий, О. О., Гриджук, Я. С., Джус, А. П., Михайлюк, В. В., Матвієнків, О. М. & Малецький, М. В. (2025). Установка для дослідження тертя бурильного замка об породу. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 53-64. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-53-64

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Малецький М. В.

Начальник колісного цеху

Акціонерне товариство «Івано-Франківський локомотиворемонтний завод»

76000, м. Івано-Франківськ, вул. залізнична, 22

e-mail: lioner1987@gmail.com

Анотація. Точність представлення в моделі процесу взаємодії бурильної колони із стінками свердловини на пряму впливає на якість результатів моделювання процесу спорудження бурильною колоною похило-скерованих свердловин, що на сьогодні є провідним методом обґрунтування вибору оптимальних режимів роботи та місця розташування в бурильній колоні генераторів осьових коливань. Зважаючи на те, що сили опору рухові бурильної колони залежать від багатьох факторів, зокрема нормальної контактної сили, механічних властивостей матеріалу бурильних труб та гірської породи, властивостей промивальної рідини, геометрії зони контакту, кінематики відносно руху та інших параметрів, взаємозв'язок між якими погано вивчений, та враховуючи об'єкт дослідження, єдиним шляхом вивчення взаємодії бурильної колони із стінками свердловини є проведення лабораторних експериментів в найбільш наближених до робочих умов. В даній роботі описано створену лабораторну установку для дослідження динаміки фрикційної взаємодії бурового замка об гірську породу. Лабораторна установка складається із корпусу, приводу, який забезпечує поступально-зворотні коливні рухи оправки на якій кріпиться бурильний замок, що знаходиться в кориті, яке заповнюється промивальною рідиною, важільного механізму, який за допомогою гідросистеми забезпечує притискання до бурового замка зразків породи та системи керування і обробки інформації із датчиків. Представлена лабораторна установка дає змогу вивчати особливості динаміки фрикційної взаємодії повнорозмірного бурового замка, що здійснює коливний рух із зразками гірської породи в середовищі промивальної рідини за різних режимів кінематики коливного руху, зусилля притискання зразків породи до бурового замка та температури промивальної рідини.

Ключові слова: бурильний замок, гірська порода, вібрації, тертя, лабораторна установка.

Вступ

Буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин супроводжується виникненням значних сил опору поздовжньому переміщенню бурильної колони, що ускладнює передачу осьового зусилля до долота. Зокрема, ця проблема є найбільш вираженою при наборі кривизни глибинним вибійним двигуном із секцією перекосу осі, коли бурильна колона в свердловині залишається нерухомою. Одним із поширених підходів до зменшення сил опору є використання в компоновці бурильної колони генераторів осьових коливань (ГОК). Однак, для ефективного застосування ГОК та розробки методик щодо вибору режимів їх роботи та місця встановлення в компоновці бурильної колони важливо розуміти динаміку процесу фрикційної взаємодії бурильних замків зі стінками свердловини. Проведення повноцінних досліджень із вивчення взаємодії бурильної колони із стінками свердловини в промислових умовах є досить складними та характеризується неповнотою інформації. Зважаючи на це, найбільш доцільно проводити такі дослідження в лабораторних умовах. Оскільки величина сил опору рухові бурильної колони залежить від багатьох факторів, зокрема, від нормальної сили, кінематики відносного руху, механічних характеристик гірської породи, властивостей промивальної рідини, геометрії та площі зони контакту тіл та інших параметрів, а взаємний вплив цих чинників є ще погано вивченим, ва-

жливо проводити лабораторні дослідження в умовах, найбільш наближених до робочих. Зважаючи на це, авторами розроблено та виготовлено установку для дослідження сил тертя бурильного замка об гірську породу, опису особливості конструкції якої та її робочих параметрів присвячена дана стаття.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

У більшості досліджень з вивчення особливостей роботи бурильної колони із установленим ГОК взаємодію бурильної колони зі стінкою свердловини моделюють одним із відомих законів динамічного тертя із коефіцієнтами, виведеними емпіричним шляхом за результатами промислових досліджень [1–5]. Однак, отримані промислові дані показують значну розбіжність результатів та вагомий вплив на їх зміну особливостей гірської породи, властивостей промивальної рідини, режимів роботи бурильної колони та її конструкції та інших чинників. Все це призводить до того, що застосовані підходи без детального вивчення динаміки фрикційної взаємодії бурильної колони зі стінками свердловини дають змогу лиш наближено визначати прогнозовані сили опору рухові бурильної колони у проєктній свердловині та, відповідно, ускладнюють підбір оптимальних рішень для нівелювання дії негативних чинників. Враховуючи це, сформована актуальна наукова задача з вивчення осо-

бливостей динаміки фрикційної взаємодії бурильної колони зі стінками свердловин із врахуванням впливу всіх основних чинників. Одним із основних напрямків вирішення цієї задачі, враховуючи особливості об'єкта досліджень, є проведення лабораторних експериментів.

В роботі [6] описано установку, призначену для дослідження процесу взаємодії елементів бурильної колони зі стінкою обсадної колони. Конструкція установки представляє собою раму, на якій встановлено підрамник із секцією обсадної колони, що може обертатись за допомогою привода. На рамі також встановлено рухому каретку із валом, на який закріплено елемент бурильної колони, який може переміщуватись вздовж осі обсадної колони за допомогою гідроциліндра та здійснювати обертання від привода, що змонтований на каретці. Установка дає можливість досліджувати взаємодію із обсадною колоною елемента бурильної колони довжиною до 300 мм та діаметром 90-203 мм. Максимальна відносна частота обертання, яку забезпечує установка, складає 190 об/хв, а осьове переміщення відбувається із швидкістю до 5 м/год на загальну довжину до 700 мм. Максимальне зусилля притискання, що може бути розвинуте, становить 300 кг. Для врахування впливу промивальної рідини в зону контакту забезпечується подача рідини насосом (в дослідженнях використовувалась вода). За допомогою встановлених давачів забезпечено одночасний запис частоти обертання вала, крутного моменту на ньому, осьової сили, необхідної для переміщення вала, та зусилля притискання. До переваг установки можна віднести можливість вивчення взаємодії бурильної колони зі стінками свердловини при одночасному осьовому русі та обертанні. Проте недоліками є неможливість вивчення фрикційної взаємодії за наявності осьових коливань бурильної колони, зокрема, викликаних роботою ГОК, як одного із найбільш поширених методів зменшення сил опору. Складність проведення досліджень із взаємодії бурильної колони зі гірською породою у відкритій свердловині (для цього необхідна попередня обробка та підготовка зразків породи значних розмірів) та обмеження розмірів елемента бурильної колони, який встановлюється на вал. Все це не дає змогу вивчати контактну взаємодію повнорозмірного бурового замка, а отже, оцінити вплив його форми на сили тертя.

Peng Wang та інші в роботі [7] досліджували особливості динамічного тертя сталі об пісковик та сланець при контактних силах 40-

200 Н і за наявності поздовжніх та поперечних вібрацій частотою від 0 до 500 Гц за амплітуди коливань 10 мм. Для цього було створено трибологічну установку, що складається із корпусу, електродинамічного модального вібратора, лінійного привода, навантажувача, тіл тертя у вигляді прямокутних паралелепіпедів та давачів. Ця установка дала змогу досліджувати величину сил тертя між двома зразками з наявною малою відносною швидкістю руху за наявності поздовжніх або поперечних вібрацій. За отриманими даними визначались приведені коефіцієнти тертя для моделей Кулона та Дала (Dahl). Результати показали наявність на частоті 100 Гц локальних мінімумів на графіках зміни коефіцієнтів тертя в залежності від частоти коливань. Враховуючи обрану в дослідженні дискретність зміни частоти коливань у 100 Гц, отримати більш точне значення «оптимальної» частоти коливань для зменшення сил опору з одержаних результатів неможливо. Перевагою запропонованої установки є можливість досліджувати фрикційну взаємодію тіл в доволі широкому діапазоні вібрацій. До недоліків можна віднести відсутність врахування впливу промивальної рідини, температури середовища, а також ідеалізовані зразки тіл тертя, якість підготовки поверхонь, тертя яких не зустрічається в промислових умовах.

У [8; 9] описано удосконалену установку для дослідження особливостей фрикційної взаємодії гірської породи (використовувався зразок сланцю кубічної форми з стороною ребра 4 см) зі сталевим зразком в середовищі промивальної рідини. Установка складається із корпусу, механізму прикладання осьової сили, вібростолу з пристроєм для кріплення зразка гірської породи, пристрою забезпечення відносного переміщення зразка матеріалу відносно зразка гірської породи та давачів. Установка забезпечує можливість приводити досліджувати сили опору при відносному рухові двох зразків зі швидкістю до 5 мм/с, та наявністю вібрацій частотою від 5 до 3000 Гц та амплітудою від 1 до 50 мм. Максимальна нормальна контактна сила між зразками в установці - 200 Н. Ця установка є найбільш досконалою та наближеною до умов роботи досліджуваного об'єкта. До її недоліків можна віднести геометричні характеристики зони контакту двох тіл, через їх незначні розміри. Установка дає змогу вивчати фрикційну взаємодію між зразком сталі та відносно міцною однорідною ізотропною породою, але не дає можливості визначити вплив площі контакту тіл на величину сил опору рухові.

Недоліком всіх розглянутих установок є також те, що при дослідженні за тіло тертя не використовується повнорозмірний буровий замок, що унеможливує врахування впливу особливостей його геометрії на силу опору рухові бурильної колони. Іншим недоліком є те, що особливості динаміки фрикційної взаємодії досліджені лише за наявності гармонічних вібрацій, хоча на сьогодні одним із напрямків оптимізації роботи ГОК є зміна їх закону коливного руху [10–12].

Постановка задачі

На основі проведеного аналізу існуючих досліджень поставлено мету – дослідити особливості динаміки фрикційної взаємодії бурильної колони зі зразками гірської породи за наявності осьових вібрацій в умовах, максимально наближених до реальних умов роботи бурильної колони. Для досягнення мети слід розробити лабораторну установку. Результати наявних досліджень напружено-деформованого стану бурильної колони в похило-скерованих свердловинах свідчать, що контакт колони зі стінками свердловини, як правило, відбувається в місцях розташування бурових замків. Прогин тіла бурильної труби зазвичай недостатній для виникнення значного контакту з гірською породою, який міг би істотно впливати на загальну силу опору рухові колони [13–15]. З огляду на це, прийнято, що в лабораторній установці дослідження слід проводити для взаємодії повнорозмірного бурового замка зі зразками гірської породи в середовищі промивальної рідини, за контактних сил, співрозмірних із тими, що виникають під час спорудження свердловин. Така схема досліджень дозволяє одночасно аналізувати розвиток контактної поверхні двох тіл під дією контактної навантаження та осьових вібрацій, а також оцінювати їх вплив на величину сил опору рухові без необхідності застосування приведених коефіцієнтів. Крім того, в установці необхідно забезпечити можливість генерування осьових вібрацій із регульованими амплітудою, частотою та законом коливань, наближеними до основних і перспективних режимів роботи.

Загальний опис установки

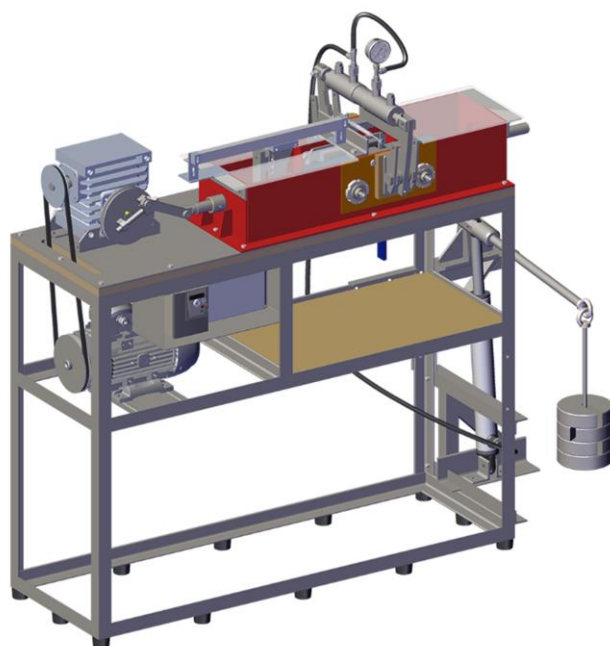
З урахуванням наведених вимог розроблено дослідну лабораторну установку для вивчення динаміки фрикційної взаємодії бурильного замка з гірською породою (рис. 1). Її конструкцію та принцип роботи проілюстровано на схемі, зображеній на рис. 2. Установка складається з корпусу 1, на якому розміщено

привод, що складається із трифазного асинхронного електродвигуна 2, пасової передачі та черв'ячного редуктора 3 з передавальним числом 1:40. Використання черв'ячного редуктора, якому властиве самогальмування, дає змогу мінімізувати інерційний вплив руху оправки на кінематику коливального процесу. На вихідному валу редуктора 3 встановлено планшайбу, до якої кріпиться кривошипно-шатунний механізм 4, що забезпечує зворотно-поступальний рух оправки 8 із закріпленим на ній буровим замком у кориті 5. Конструкцією передбачено можливість зміни довжини кривошипа в межах 0–50 мм шляхом переміщення сухаря за допомогою установчого гвинта, що дозволяє регулювати амплітуду осьових коливань оправки. На оправці 8 встановлено тензодавач 12 Rayte LQB 320C (діапазон вимірювання осьових зусиль 0–20 кН), до якого приєднано каретку оптичної лінійки 11 HXX DRO GCS898 з ходом 350 мм і точністю 0,005 мм. Дані цих давачів дозволяють синхронно фіксувати кінематику коливного руху оправки з буровим замком та осьові сили опору поздовжньому рухові.

Буровий замок контактує у діаметрально протилежних точках із двома зразками гірської породи 14, початкова форма яких - паралелепіпед розмірами 170×75×40 мм. Для зручності зразки закріплюються у швидкозмінних тримачах, які монтуються на стіл за допомогою пальців і швидкознімних пружинних шайб. Рівномірне притискання зразків забезпечується двома важільними механізмами 16 із передавальним відношенням плечей 1:4 та гідроциліндрами 10 (робочий діаметр 40 мм), між якими встановлено тензодавач 9 Qilichuangan LQB-130 (0–20 кН) для вимірювання поточного значення контактної сили між тілами тертя. Між тримачами породи розміщено лінійний потенціометр 15 Shenzhen KPM12J (хід 0–50 мм), який вимірює відносне переміщення зразків. Отримані дані використовуються для визначення значення площі контакту, оцінки інтенсивності каверноутворення та уточнення сили притискання.

Під час досліджень корито 5 заповнюється промивальною рідиною так, щоб вона повністю покривала буровий замок і зразки породи. Для наближення умов до реальних рідина підігрівається ТЕНом 17 Sndheater DN40 (3 кВт), а її температура контролюється термопарою 13 WRNT-02.

Частота та закон коливного руху оправки регулюються зміною частоти живлення електродвигуна 2 за допомогою частотного пере-



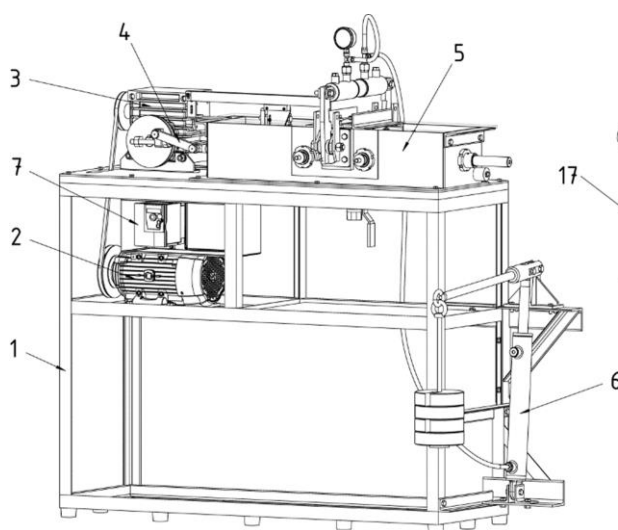
А



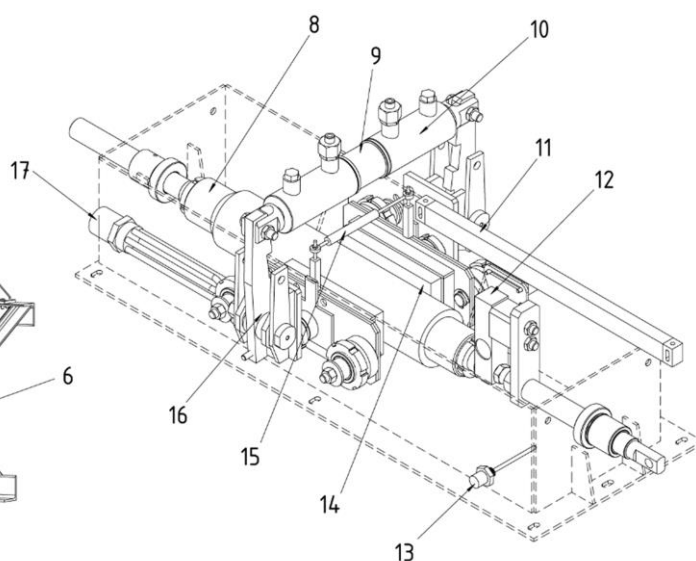
Б

А – тривимірна модель, Б – лабораторна установка

Рисунок 1 – Установка для дослідження динаміки фрикційної взаємодії бурильного замка з гірською породою



А



Б

А – загальний вигляд, Б – основні виконавчі механізми в кориті

Рисунок 2 – Схематичне зображення установки

творювача 7 Sako SKI600 (380 В, 2,2 кВт), який забезпечує зміну частоти струму в межах 5–400 Гц. Частотний перетворювач керується системою управління, що також виконує збір, фільтрацію та дискретизацію сигналів із датчиків і передає дані на персональний комп'ютер.

Гідравлічна система

Гідравлічна система лабораторної установки призначена для забезпечення притискання двох зразків породи до бурового замка із заданим зусиллям, незалежно від їх висоти, розмірів замка та ступеня виробітку породи. Принципова схема системи наведена на рис. 3. Первинне навантаження створюється набором

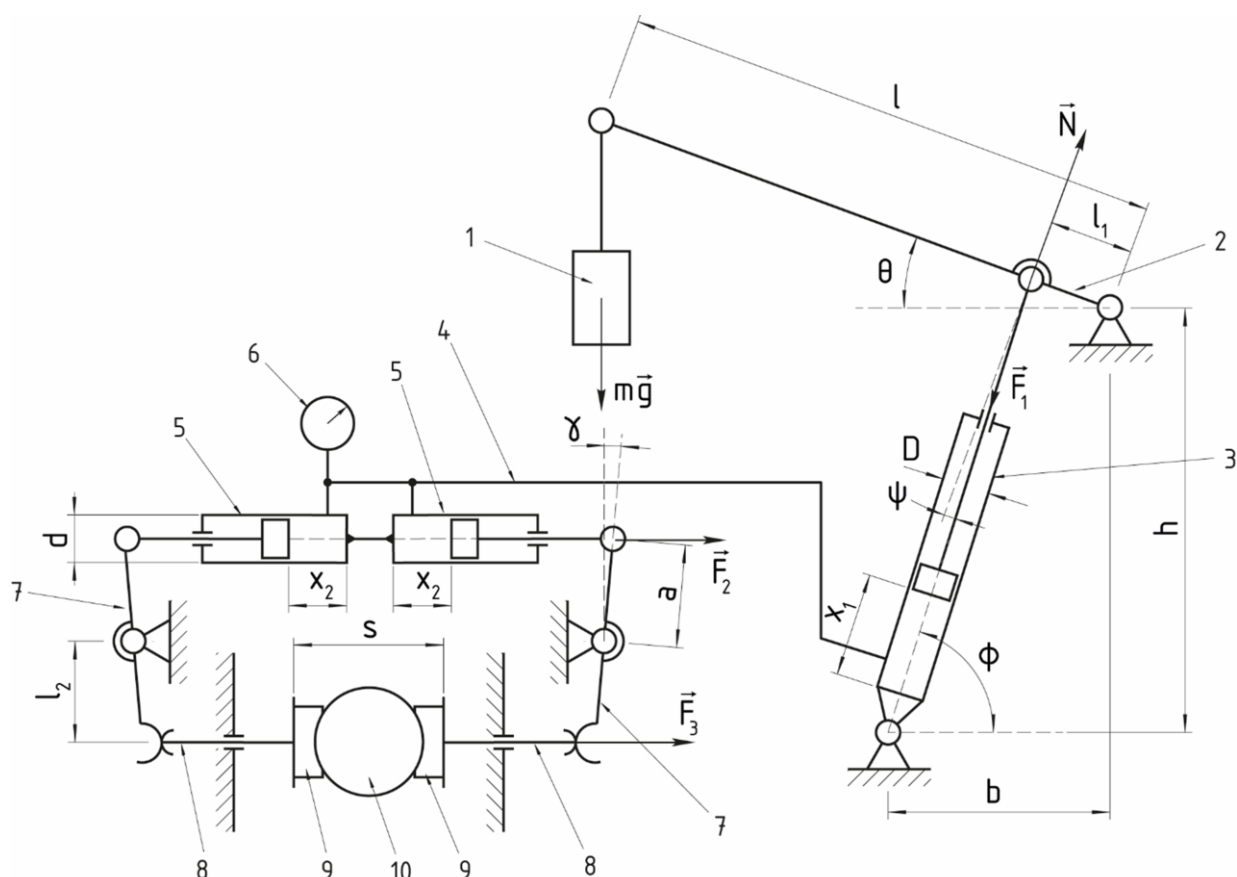
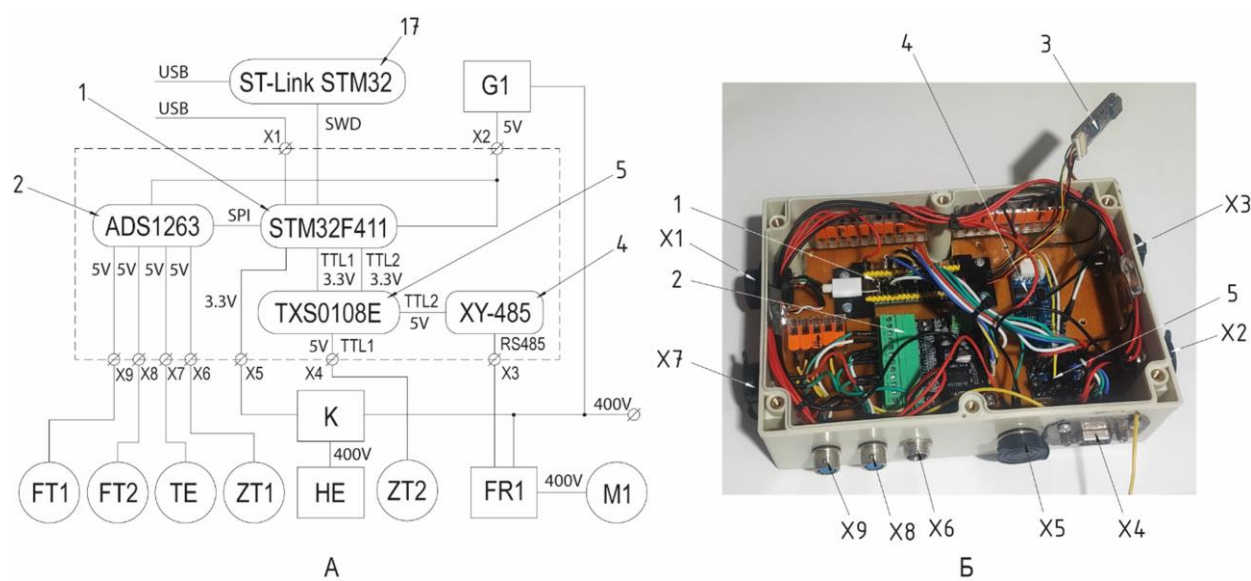


Рисунок 3 – Принципова схема гідравлічної системи установки



А – принципова схема системи; Б – блок керування

Рисунок 4 – Система керування та обробки інформації

лабораторних гир 1 вагою mg , які встановлюються на тримачі, та через кінець важеля 2 передають зусилля на шток гідроциліндра 3 (діаметр $D = 50$ мм). Унаслідок цього в системі утворюється тиск p , що через рукав 4 подається до двох робочих гідроциліндрів 5 (діаметр $d = 40$ мм). Тиск контролюється за допомогою

манометра 6 (грубо) та тензодавача, встановленого між гідроциліндрами 5 (точно). Далі зусилля від гідроциліндрів 5 передається через коромисла 7 на повзуни 8, до яких прикріплено тримачі зразків 9, що притискаються до бурового замка 10.

Конструкцією передбачено повертання важеля 2 у межах $\theta = -35^\circ \dots +45^\circ$, що забезпечує повний хід поршнів гідроциліндрів 5 ($x_{2\max} = 50$ мм). Перевагою розробленої важільної установки є можливість досягнути відносно великих значень сил, що дозволяє створювати широкий діапазон сил контакту між породою і буровим замком, використовуючи відносно невеликий набір гир. Недоліком схеми є варіативність зусилля притискання залежно від положення важеля 2.

Для кількісної оцінки характеристик системи нижче подано її математичну модель.

Із наведеної схеми визначимо зусилля, прикладене до поршня гідроциліндра 3:

$$F_1 = \frac{mgl \cos \theta}{l_1} \sin \left(\theta + \arctan \left(\frac{h + l_1 \sin \theta}{b - l_1 \cos \theta} \right) \right). \quad (1)$$

Величина переміщення поршня x_1 залежно від кута θ повороту важеля рівна:

$$x_1 = \sqrt{(b - l_1 \cos \theta)^2 + (h + l_1 \sin \theta)^2} - \Delta, \quad (2)$$

$$F_3 = \frac{mgl \cos \theta}{l_1} \sin \left(\theta + \arctan \left(\frac{h + l_1 \sin \theta}{b - l_1 \cos \theta} \right) \right) \frac{d^2}{D^2} \frac{a}{l_2} \times \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sqrt{(b - l_1 \cos \theta)^2 + (h + l_1 \sin \theta)^2} - \Delta - x_{1\min}}{a} \right) \right) \frac{D^2}{2d^2} - 0.5x_{2\max} \quad (5)$$

Підставлення значень розмірів у формулу (5) показує, що створена система забезпечує вигаш у силі приблизно в 31 раз, а зміна зусилля притискання в крайніх положеннях важеля становить приблизно 55 % від його максимального значення. Слід зазначити, що для більшості зразків гірських порід процес їхнього спрацювання та каверноутворення відбувається відносно повільно порівняно з тривалістю експерименту з дослідження фрикційних властивостей. З огляду на це, для типових експериментів зміну нормальної сили притискання, спричинену переміщенням важеля 2, можна вважати незначною і нею знехтувати.

У подальшому можливе удосконалення гідравлічної системи шляхом заміни важільного механізму на керований насос-дозатор, який працюватиме за командами контролера на основі сигналів тензодавача, встановленого між гідроциліндрами 5, та лінійного потенціометра, що вимірює відносне переміщення зразків породи.

де Δ – приведена величина, яка визначається як різниця загальної довжини BO_1 при куті $\theta = 0^\circ$ до значення x_1 при заданому куті.

За відомою величиною зусилля на штоку гідроциліндра 3, нехтуючи опором в гідравлічній системі, можна визначити зусилля притискання зразків породи на штоках гідроциліндрів 5:

$$F_2 = F_1 \frac{d^2}{D^2}, \quad F_3 = F_2 \frac{a \cos \gamma}{l_2}, \quad (3)$$

де γ – кут відхилення коромисла 7 від вертикалі. Приймаємо, що коромисло займає вертикальну позицію, коли поршень в гідроциліндрі 5 знаходиться посередині циліндра, тоді:

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{x_2 - 0.5x_{2\max}}{a} \right), \quad x_2 = (x_1 - x_{1\min}) \frac{D^2}{2d^2}, \quad (4)$$

де $x_{1\min}$ – мінімальна значення положення поршня гідроциліндра 3.

Здійснивши математичні перетворення, отримаємо функцію для визначення залежності зміни зусилля притискання зразків гірської породи від кута повороту важеля 2 (формула 5).

Система керування

Система керування та обробки інформації призначена для забезпечення заданих режимів проведення досліджень, а також для отримання, оброблення та передачі експериментальних даних із давачів на персональний комп'ютер у необхідному форматі. Вона складається з блоку керування та зовнішнього обладнання, що підключається до нього. Принципова схема системи керування та обробки інформації наведена на рис. 4а, а конструктивне виконання блоку керування показано на рис. 4б.

Система побудована на базі мікроконтролера 1 - STM32F411CEU6 із встановленим кварцовим генератором частотою 25 МГц, що забезпечує необхідну продуктивність для оброблення значної кількості переривань. Мікроконтролер виконує такі функції:

– здійснює обмін даними з персональним комп'ютером через USB-інтерфейс (віртуальний COM-порт), отримуючи план експеримен-

тів, команди управління та передаючи виміряні дані у заданому форматі;

- формує точні часові мітки моменту зняття даних із давачів;

- через конвертер протоколу XY-485 (перетворювач TTL $\leftrightarrow$ RS485) забезпечує комунікацію з частотним перетворювачем FR1 Sako SKI600, установлюючи необхідну частоту обертання електродвигуна M1;

- формує сигнал керування реле К, що вмикає або вимикає нагрівальний елемент HE Sndheater DN40 3 kW, який використовується для підігріву промивальної рідини;

- здійснює підрахунок імпульсів від оптичної лінійки ZT2 HXX DRO GCS898 та відповідно визначає лінійне переміщення оправки;

- керує роботою прецизійного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ADS1263, задає його режими та зчитує цифрові дані від давачів.

Оброблення сигналів від первинних перетворювачів – двох тензодавачів FT1 Raytei LQB-320C та FT2 Qilichuangan LQB-130, термопари TE WRNT-02 та лінійного потенціометра ZT1 Shenzhen KPM12J, здійснюється прецизійним 32-бітним дельта-сигма АЦП Texas Instruments ADS1263. Цей АЦП має вбудований програмований підсилювач із коефіцієнтом підсилення 1–32 $\times$, цифрові фільтри, допоміжний 24-бітний перетворювач, а також внутрішнє джерело опорного струму та давач температури, що забезпечує низький дрейф і високу стабільність вимірювань. Відповідно до технічних характеристик мікросхеми та вимог до лабораторної установки основний 32-бітний канал використовується для вимірювання сигналів тензодавачів FT1 і FT2, тоді як допоміжний 24-бітний канал обслуговує термопару TE та потенціометр ZT1. Така конфігурація забезпечує точність 19–21 біт (залежно від рівня підсилення) і частоту дискретизації близько 3600 вимірів за секунду для тензодавачів, а також точність 16 біт і частоту 200 вимірів за секунду для температурних та лінійних сигналів.

З огляду на те, що оптимальна частота роботи генераторів осьових коливань становить 12–22 Гц, наведена схема дозволяє отримувати 160–300 дискретних значень за один цикл коливного руху, що є достатнім для реалізації поставлених експериментальних задач. Крім того, передбачено можливість віддаленого програмного налаштування АЦП перед запуском дослідження, завдяки чому можна гнучко змінювати співвідношення між точністю та швидкістю або переключити один із каналів на об-

роблення сигналу від давача FR2 за допомогою 24-бітного АЦП, за рахунок чого підвищити дискретність сигналу давача FR1.

Живлення системи забезпечує стабілізоване джерело постійного струму G1 S-25-5 із вихідною напругою 5 В і потужністю до 25 Вт, яке гарантує надійну роботу мікросхем та давачів. Для узгодження рівнів логічних сигналів між ланцюгами 3,3 В і 5 В застосовується дво-напрямний перетворювач логіки TXS0108E, що забезпечує сумісність усіх цифрових інтерфейсів системи.

Особливості проведення дослідів

Для дослідження впливу окремих чинників на величину та характер фрикційної взаємодії бурильного замка з гірською породою необхідно виконати серію лабораторних дослідів із різними значеннями цих чинників згідно з планом експерименту, який розробляється за відомими методиками. Особливістю створеної установки є те, що зміна окремих факторів у процесі дослідження потребує різних обсягів ресурсів і різного рівня налаштування обладнання, що слід ураховувати під час планування досліджень. Зміни експериментальних чинників, які може реалізувати установка, доцільно поділяти на три групи. Перша – це ресурсомісткі налаштування, що потребують глибокої підготовки системи, до яких належить заміна бурильного замка, зміна промивальної рідини або типу гірської породи. Друга група охоплює налаштування, що вимагають зупинки установки та ручного механічного регулювання, зокрема встановлення величини нормальної притискної сили й амплітуди коливань. Третя група містить параметри, які можна змінювати програмно через мікроконтролер – це частота та закон коливного руху, температура промивальної рідини та тривалість експерименту.

Найбільш трудомістким етапом проведення дослідження є підготовка зразків гірської породи, послідовність якої подано на рис. 5. Спочатку проводиться оцінка, класифікація та відбір зразків, що не мають тріщин, включень або інших дефектів, і придатні до подальшої механічної обробки наявним обладнанням (рис. 5,а). Далі із відібраних зразків вирізають паралелепіпеди необхідних розмірів, які вклеюють у породотримачі, після чого здійснюють їх остаточну механічну обробку для забезпечення паралельності поверхонь контакту відносно основи тримача (рис. 5,б). Підготовлені зразки встановлюють у відповідні місця лабораторної установки для подальшого проведення експериментів (рис. 5,в).



А – відібраний зразок гірської породи; Б – вирізані та вклеєні у породотримачі зразки;
В – породотримачі із зразками породи, встановлені на столи в лабораторній установці
Рисунок 5 – Етапи підготовки гірської породи до експерименту

Враховуючи зазначене і те, що заміна промивальної рідини потребує очищення установи й заміни зразків породи, щоб виключити вплив залишків попередньої рідини в порах на результати експериментів, досліди слід групувати за парами «гірська порода – промивальна рідина». Для кожної такої пари формується перелік необхідних випробувань із заданими параметрами в установленому форматі, який передається на мікроконтролер. Він у встановленому порядку послідовно виконує експерименти, витримує задані часові інтервали та програмно змінює параметри; у разі потреби ручних регулювань відбувається зупинка установи з поданням відповідного повідомлення на комп'ютер щодо необхідних дій оператора. Такий підхід оптимізує організацію експериментальної роботи та мінімізує вплив технічних операцій на однорідність і відтворюваність результатів.

Висновки

Розроблена лабораторна установка для дослідження динаміки фрикційної взаємодії повнорозмірного бурового замка із зразками гір-

ської породи в середовищі промивальної рідини дає змогу вивчати зміну величини сил опору від величини контактної сили, кінематики відносного коливного руху, температури промивальної рідини для різних зразків гірської породи та промивальних рідин. Ця установка найбільш наближено до робочих умов відтворює взаємодію бурового замка із стінками відкритої свердловини, притаманну для спорудження похило-скерованих і горизонтальних ділянок свердловини бурильною колоною із встановленим ГОК, що приводиться в рух за допомогою вибірного двигуна. Результати лабораторних досліджень на цій установці можуть бути використані для покращення моделей бурильної колони, які застосовують для обґрунтування оптимальних режимів буріння та роботи ГОК.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Слабий О. О., Гридчук Я. С., Царук В. Ф., Кондур Т. І., Мохній І. Ю. Визначення оптимального місця розташування генератора осьових коливань в бурильній колоні. *Нафтогазова енергетика*. 2024 № 1(41). С. 86–95. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-86-95.
2. Слабий О. О., Гридчук Я. С., Кондур Т. І., Мохній І. Ю. Імітаційна модель бурильної колони з установленим генератором осьових коливань. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023 № 3(88). С. 49–60. DOI: 10.31471/1993-9973-2023-3(88)-49-60.

3. Shi X., Huang W., Gao D., Zhu N. Optimal design of drag reduction oscillators by considering drillstring fatigue and hydraulic loss in sliding drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022: Vol. 208. P.109572. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109572.
4. Shi X.-L., Huang W.-J., Gao D.-L. Mechanical behavior of drillstring with drag reduction oscillators and its effects on sliding drilling limits. *Petroleum Science*. 2021: T. 18 № 6. C. 1689–1697. DOI: 10.1016/j.petsci.2021.09.007.
5. Wang X., Ni H., Wang R., Zhang L., Wang P. Drag-Reduction and Resonance Problems of a Jointed Drillstring in the Presence of an Axial Excitation Tool. *Journal of Energy Resources Technology*. 2019: Vol. 141 № 3. DOI: 10.1115/1.4041155.
6. Tikhonov V., Giers M., Yakhimovich V., Shemyakinsky B., Ring L. Multi-component friction testing of full-scale drill pipe specimen. *TRIBOLOGY AND DESIGN 2012: WIT Transactions on Engineering Sciences*, Kos, Greece, 03 - 05 September. 2012. P.65–76. DOI: 10.2495/TD120061.
7. Wang P., Ni H., Wang R., Li Z., Wang Y. Experimental investigation of the effect of in-plane vibrations on friction for different materials. *Tribology International*. 2016: Vol. 99. P.237–247. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.03.021.
8. Wang P., Ni H., Wang X., Wang R., Lu S. Research on the characteristics of earthworm-like vibration drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018: Vol. 160. P.60–71. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.10.027.
9. Long Y., Wang X., Wang P., Zhang F. A Method of Reducing Friction and Improving the Penetration Rate by Safely Vibrating the Drill-String at Surface. *Processes*. 2023: Vol. 11 № 4. DOI: 10.3390/pr11041242.
10. Wang X., Yao X., Hu G., Chen P. Drag reduction performance of an axial oscillating tool with different kinds of waveform using a multiscale friction model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019: T. 177. C. 135–153. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.103.
11. Wang X.-M., Yao X.-M. Vibration Technologies for Friction Reduction to Overcome Weight Transfer Challenge in Horizontal Wells Using a Multiscale Friction Model. *Lubricants*. 2018: Vol. 6 № 2. P.53. DOI: 10.3390/lubricants6020053.
12. Omojuwa E., Ahmed R. Analytical modeling of axial oscillation-supported drillstrings in high-angle wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020: T. 191. C. 107139. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107139.
13. Nguyen K.-L., Tran Q.-T., Andrianoely M.-A., Manin L., Baguet S., Dufour R., Mahjoub M., Menand S. Nonlinear rotordynamics of a drillstring in curved wells: Models and numerical techniques. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020: Vol. 166. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105225.
14. Tikhonov V., Valiullin K., Nurgaleev A., Ring L., Gandikota R., Chaguine P., Cheatham C. Dynamic Model for Stiff String Torque and Drag. *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, The Netherlands, 05-07 March. 2013. DOI: 10.2118/163566-MS.
15. Tikhonov V. S., Safronov A. I. Analysis of Postbuckling Drillstring Vibrations in Rotary Drilling of Extended-Reach Wells. *Journal of Energy Resources Technology*. 2011: Vol. 133 № 4. DOI: 10.1115/1.4005241.

References

1. Slabyi, O. O., Hrydzhuk, Ya. S., Tsaruk, V. F., Kondur, T. I., & Mokhniy, I. Yu. (2024). Vyznachennia optymalnoho mistsia roztashuvannia heneratora osovykh kolyvan v burylniy koloni. *Naftohazova enerhetyka*, (1(41)), 86–95. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1\(41\)-86-95](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-1(41)-86-95) [in Ukrainian]
2. Slabyi, O. O., Hrydzhuk, Ya. S., Kondur, T. I., & Mokhniy, I. Yu. (2023). Imitatsiyna model burylnoyi kolony z ustanovlenym heneratorom osovykh kolyvan. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*, (3(88)), 49–60. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-3\(88\)-49-60](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-3(88)-49-60) [in Ukrainian]
3. Shi, X., Huang, W., Gao, D., & Zhu, N. (2022). Optimal design of drag reduction oscillators by considering drillstring fatigue and hydraulic loss in sliding drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109572. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109572>

4. Shi, X.-L., Huang, W.-J., & Gao, D.-L. (2021). Mechanical behavior of drillstring with drag reduction oscillators and its effects on sliding drilling limits. *Petroleum Science*, 18(6), 1689–1697. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.007>
5. Wang, X., Ni, H., Wang, R., Zhang, L., & Wang, P. (2019). Drag-Reduction and Resonance Problems of a Jointed Drillstring in the Presence of an Axial Excitation Tool. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(3). <https://doi.org/10.1115/1.4041155>
6. Tikhonov, V., Giers, M., Yakhimovich, V., Shemyakinsky, B., & Ring, L. (2012). Multi-component friction testing of full-scale drill pipe specimen. *TRIBOLOGY AND DESIGN 2012: WIT Transactions on Engineering Sciences*, 65–76. <https://doi.org/10.2495/TD120061>
7. Wang, P., Ni, H., Wang, R., Li, Z., & Wang, Y. (2016). Experimental investigation of the effect of in-plane vibrations on friction for different materials. *Tribology International*, 99, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.021>
8. Wang, P., Ni, H., Wang, X., Wang, R., & Lu, S. (2018). Research on the characteristics of earthworm-like vibration drilling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 160, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.027>
9. Long, Y., Wang, X., Wang, P., & Zhang, F. (2023). A Method of Reducing Friction and Improving the Penetration Rate by Safely Vibrating the Drill-String at Surface. *Processes*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041242>
10. Wang, X., Yao, X., Hu, G., & Chen, P. (2019). Drag reduction performance of an axial oscillating tool with different kinds of waveform using a multiscale friction model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 177, 135–153. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.01.103>
11. Wang, X.-M., & Yao, X.-M. (2018). Vibration Technologies for Friction Reduction to Overcome Weight Transfer Challenge in Horizontal Wells Using a Multiscale Friction Model. *Lubricants*, 6(2), 53. <https://doi.org/10.3390/lubricants6020053>
12. Omojuwa, E., & Ahmed, R. (2020). Analytical modeling of axial oscillation-supported drillstrings in high-angle wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 191, 107139. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107139>
13. Nguyen, K.-L., Tran, Q.-T., Andrianoely, M.-A., Manin, L., Baguet, S., Dufour, R., Mahjoub, M., & Menand, S. (2020). Nonlinear rotordynamics of a drillstring in curved wells: Models and numerical techniques. *International Journal of Mechanical Sciences*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105225>
14. Tikhonov, V., Valiullin, K., Nurgaleev, A., Ring, L., Gandikota, R., Chaguine, P., & Cheatham, C. (2013). Dynamic Model for Stiff String Torque and Drag. *SPE/IADC Drilling Conference*. <https://doi.org/10.2118/163566-MS>
15. Tikhonov, V. S., & Safronov, A. I. (2011). Analysis of Postbuckling Drillstring Vibrations in Rotary Drilling of Extended-Reach Wells. *Journal of Energy Resources Technology*, 133(4). <https://doi.org/10.1115/1.4005241>

A TEST RIG FOR STUDYING THE FRICTION OF A DRILL TOOL JOINT AGAINST ROCK

Slabyi O. O.

Candidate of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-1274-2875>
e-mail: burewisnyk@gmail.com

Grydzhuk Ya. S.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-1429-8640>
e-mail: jaroslav.gridzhuk@gmail.com

Dzhus A. P.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-2660-5134>
e-mail: andrii.dzhus@nung.edu.ua

Mykhailiuk V. V.

Candidate of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0002-3329-2068>
e-mail: myhajlyukv@ukr.net

Matviienkiv O. M.

Candidate of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska st.
<https://orcid.org/0000-0003-1717-5416>
e-mail: oleh.matviienkiv@nung.edu.ua

Maletskyi M. V.

Head of the Wheel Workshop
Joint Stock Company "Ivano-Frankivsk Locomotive Repair Plant"
76000, Ivano-Frankivsk, 22 Zaliznychna st.
e-mail: lioner1987@gmail.com

Abstract. The accuracy of representing the drill string and wellbore wall interaction process in a model directly affects the quality of simulation results for well construction using a drill string. This simulation is currently the primary method for justifying the choice of optimal operating parameters and placement of axial vibration generators along the drill string. Considering that the drag forces resisting drill string motion depend on numerous factors—including normal contact force, mechanical properties of the drill pipe and rock material, drilling fluid properties, contact zone geometry, relative motion kinematics, and other parameters with poorly understood interrelationships — and given the research subject, laboratory experiments under conditions closest to real operational ones are the only viable way to study the drill string and wellbore wall interaction. This work describes a laboratory test rig developed to study the dynamics of frictional interaction between a drill pipe tool joint and rock. The rig consists of a frame, a drive system providing reciprocating oscillatory motion to a mandrel holding the tool joint (located in a trough filled with drilling fluid), a lever mechanism (using a hydraulic system to press rock samples against the tool joint), and a control and data acquisition system from sensors. The presented laboratory rig enables the study of frictional interaction dynamics between a full-size, oscillating drill pipe tool joint and rock samples immersed in drilling fluid. It allows for varying the kinematics of the oscillatory motion, the force pressing the rock samples against the tool joint, and the temperature of the drilling fluid.

Keywords: drill pipe tool joint, rock, vibrations, friction, laboratory test rig.