

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 622.248.6:621.318.2

DOI: 10.31471/1993-9965-2024-1(56)-25-33

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЧИННИКІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ МАГНІТНИХ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Т. Л. Романишин*, П. М. Присяжнюк, Л. І. Романишин, Т. П. Венгринюк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,
e-mail: tarasromanushin@gmail.com

Процес спорудження нафтогазових свердловин супроводжується періодичними відмовами та руйнуванням бурового інструменту, в результаті чого на вибої залишаються різні за формою і масою металеві уламки. Для ліквідації аварій та очищення вибоїв нафтових і газових свердловин від металевих предметів широко використовують магнітні ловильні пристрої. Ловильні пристрої на основі постійних магнітів працюють у важких умовах, які ще більше ускладнюються зі зростанням глибини свердловин. Тому, метою роботи є дослідження впливу експлуатаційних чинників на ефективність роботи магнітних пристроїв. Для цього проаналізовано умови експлуатації та встановлено чинники, що впливають на роботу ловильних пристроїв з постійними магнітами. До них відносяться: діаметр та орієнтація свердловини, тип промивальної рідини, маса, розміри та матеріал аварійних уламків, наявність шламу на вибої свердловини, вібрації, удари, висоті тиски та температури. Для встановлення впливу високих температур на силові характеристики магнітних систем ловильних пристроїв проведено теоретичні дослідження з використанням методу скінченних елементів. В результаті отримано значення вантажопідіймальної сили для магнітних систем з різними марками постійних магнітів. Встановлено, що силові характеристики систем зменшуються із підвищенням температури навколишнього середовища. Із перевищенням верхньої межі робочої температури постійних магнітів зниження вантажопідіймальної сили відбувається значно швидше. Також досліджено вплив довжини постійних магнітів на термостабільність магнітних систем. Розроблено рекомендації щодо застосування рідкісноземельних неодимових постійних магнітів в магнітних системах ловильних пристроїв в свердловинах різної глибини.

Ключові слова: ловильний пристрій; магнітна система; постійний магніт; вантажопідіймальна сила; вибій свердловини; ферромагнітний предмет.

The process of constructing oil and gas wells is accompanied by periodic failures and breakdowns of drilling tools, resulting in metal fragments of various shapes and weights remaining at the bottom of the well. Magnetic capture devices are widely used to prevent accidents and to clean the bottom of oil and gas wells of metal objects. Permanent magnet based trapping devices operate under harsh conditions that become more complicated as the well depth increases. Therefore, the objective of this work is to investigate the influence of operational factors on the efficiency of magnetic devices. To this end, we have analyzed the operating conditions and identified the factors that affect the operation of permanent magnet traps. These include: well diameter and orientation, type of flushing fluid, mass, size and material of accidental debris, presence of mud on the well, vibration, shock, pressure and temperature. Theoretical studies using the finite element method were conducted to determine the effect of high temperatures on the force characteristics of the magnetic systems of the collectors. As a result, the lifting force values for magnetic systems with different brands of permanent magnets were obtained. It was found that the force characteristics of the systems decrease with increasing ambient temperature. When the upper limit of the operating temperature of permanent magnets is exceeded, the decrease of the lifting force is much faster. The influence of the length of permanent magnets on the thermal stability of magnetic systems is also investigated. Recommendations for the use of rare-earth neodymium permanent magnets in magnetic systems of wellhead traps of various depths have been developed.

Keywords: fishing tool; magnetic system; permanent magnet; hoisting capacity; bottom hole; ferromagnetic object.

Вступ

На сучасному етапі розвитку нафтогазової промисловості важливого значення набувають проблеми технічного переоснащення, впровадження інноваційних технологій та сучасної техніки. Під час спорудження нафтових і газових свердловин, а також в процесі їх експлуатації виникають аварійні ситуації. Отже, ловильні роботи можуть знадобитися в будь-який період життєвого циклу свердловини – від початку буріння до закінчення терміну експлуатації. В деяких випадках аварії трапляються під час виконання аварійно-відновлювальних робіт.

Загалом вартість ловильних робіт складає 25 % від витрат на спорудження свердловин по всьому світу [1]. Вартість проведення ловильної операції із вилучення частини компоновки низу бурильної колони (КНБК) з свердловини глибиною 3000 м становить близько 20 тис. дол. США [2]. Сюди входить безпосереднє проведення ловильних робіт та витрати на простій бурової установки. Варто зазначити, що вартість спорудження свердловини постійно зростає. Так, добові витрати на буріння свердловин на віддалених морських родовищах або на значних глибинах можуть сягати 1 млн дол. США [3].

Політика деяких нафтогазових компаній передбачає припинення виконання ловильних робіт, якщо витрати на їх проведення досягають половини вартості буріння бокового стовбура [1, 4]. Часто буріння бокових похило-скерованих чи горизонтальних ділянок може виявитися дешевшим, ніж тривале проведення ловильних робіт [5]. Тому перед проведенням аварійних робіт необхідно ретельно вивчити загальні витрати на відновлення свердловини та порівняти з альтернативними варіантами.

Кожне рішення про доцільність проведення чи відмови від ловильних робіт створює певні ризики, проте завжди потрібно прагнути зберегти стовбур свердловини. Перспективним способом оцінки тривалості ловильних робіт є застосування технологій штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, для вивчення попереднього досвіду та опрацювання великого масиву вхідних даних [6]. Отримані дані також можна використовувати для прогнозування аварійних ситуацій. На сьогодні відомі інтелектуальні системи для підвищення ефективності бурових робіт та зменшення витрат на їх виконання. Зокрема, розроблено інтегроване програмне забезпечення [7], що допомагає інженерам прийняти оптимальне рішення стосовно технологічних процесів спорудження свердловин.

Відоме твердження, що будь-який інструмент, який опускається в свердловину, може залишитися в ній і будь-який предмет із зовнішнім діаметром, меншим за діаметр свердловини, може потрапити в свердловину [5]. У свердловині можуть залишатися елементи бурильної колони, вибійні двигуни, породоруйнівний інструмент, геофізичні пристрої та інше. Відомі випадки падіння сторонніх металевих предметів у свердловину під час виконання спуско-підіймальних операцій [3]. Залишені в свердловині аварійні предмети перешкоджають виконанню технологічних операцій, тому їх потрібно вилучати на поверхню із застосуванням ловильних робіт.

Згідно з [1], найбільш поширеним аварійним предметом є шарошка бурового долота. У випадку заклинювання опори на вибої свердловини можуть залишитися елементи тіл кочення, цілі шарошки або секції доліт. Варто зазначити, що за останній час кількість аварій з долотами значно зменшилася. Застосування якісних доліт провідних світових компаній та збільшення обсягів буріння долотами PDC дозволило суттєво підвищити техніко-економічні показники буріння, одночасно зменшивши аварійність. Разом з тим, експлуатація полікристалічних алмазних доліт передбачає перед їх спуском ретельне очищення вибою від металевих уламків.

Для вилучення із свердловин дрібних металевих уламків застосовують магнітні ловильні пристрої [3, 5, 8]. Також їх доцільно включати до складу КНБК для вилучення продуктів руйнування, що утворюються в результаті фрезерування залишених у свердловині феромагнітних предметів [9, 10]. Широке різноманіття аварійних металевих предметів на вибоях свердловин зумовлює проблему вибору оптимального пристрою для проведення ловильних робіт. Враховуючи збільшення витрат на буріння, ловильний інструмент повинен вилучати металеві уламки за одну спуско-підіймальну операцію. Ефективність проведення ловильної операції залежить від багатьох чинників, таких як: розміри та розташування предмету, орієнтація стовбура свердловини, наявність шару шламу на вибої, високі тиски та температура, обважена промивальна рідина та ін. Тому метою роботи є дослідження впливу експлуатаційних факторів на ефективність роботи магнітних пристроїв.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень

Діаметр свердловини та її орієнтація суттєво впливають на вибір типу і діаметру ловильного інструменту, а також обмежують простір для виконання технологічних операцій з аварійними предметами. У свердловинах великого діаметру виникають складнощі в процесі спуску свинцевої печатки з метою визначення положення і форми аварійного предмету [4]. На морських платформах діаметр отвору водовідділяючої колони досягає значення 1 м, що створює можливість падіння в свердловину досить крупних предметів [4].

На сьогоднішній день із збільшенням глибин буріння конструкція свердловин та геометрія їх стовбурів стає все складнішою. Щорічно зростає обсяг спорудження похило-скерованих і горизонтальних свердловин. Відомо, що свердловини з горизонтальними ділянками значно складніше очищати від шламу та металу [3]. Процес ускладнюється тим, що на цих ділянках потік промивальної рідини спрямований перпендикулярно до гравітаційних сил, що діють на частинки шламу, а також через ексцентричне розміщення бурильної колони. В похило-скерованій свердловині за незмінної швидкості висхідного потоку кількість шламу і металевого скрапу, що виноситься потоком промивальної рідини на денну поверхню, зменшується зі зростанням зенітного кута. Якщо зенітний кут становить від 20° до 40° – на поверхню виноситься близько 90 % шламу, від 40° до 60° – не більше 50 % вибуреної гірської породи, від 60° до 85° – не більше 20 % частинок твердої фази. З метою ефективного очищення стовбурів похило-скерованих та горизонтальних свердловин за значення зенітного кута більше 40° слід підвищувати швидкість висхідного потоку промивальної рідини в 2-4 рази порівняно з аналогічними умовами промивання вертикальних свердловин.

Відомий випадок ліквідації аварії з свердловини з кутом нахилу від вертикальної осі 80° в інтервалі від 762 м до фактичної глибини [3]. Після фрезерування заклиненого пакера в свердловині залишилася велика кількість металевих уламків. В результаті трьох спусків ловильної компоновки, що містила магнітний металоуловлювач, на поверхню підняли 279 кг металу.

Автори [11] наголошують, що металеві уламки є причиною виникнення багатьох ускладнень та збільшення витрат, особливо при спорудженні глибоких морських свердловин та свердловин із значним зенітним кутом. За результатами вивчення досвіду буріння понад 500

свердловин в період з 2013 по 2016 роки встановлено, що магнітні пристрої можна ефективно застосовувати для вилучення металевих уламків, отриманих в результаті фрезерних робіт [9]. Крім того, доцільне поєднання магнітних пристроїв та шламоуловлювачів для видалення більшої кількості аварійних предметів та скрапу.

В роботі [10] описано інструмент для вилучення уламків із складних ділянок свердловини. Кільцева векторна система пристрою захоплює металеві та неметалеві предмети шляхом циркуляції потоку рідини через відповідні канали та насадки, що створюють вакуум в нижній частині інструменту. Успішні випадки застосування інструменту на свердловинах Мексиканської затоки та Північного моря підтверджують його ефективність під час вилучення аварійних предметів та скрапу, а також зменшення часу на ловильні роботи за рахунок зменшення СПО.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження впливу експлуатаційних факторів на ефективність роботи магнітних пристроїв. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз умов експлуатації та встановити чинники, що чинять вплив на процес уловлювання феромагнітних предметів у свердловині;
- провести теоретичні дослідження високотемператур на силові характеристики магнітних систем ловильних пристроїв;
- дослідити вплив геометричних розмірів магнітотвердих матеріалів на уловлювальну здатність магнітних систем.

Висвітлення основного матеріалу

Магнітні ловильні пристрої призначені для вилучення аварійних феромагнітних предметів із свердловин в умовах високих температур, гідростатичних тисків, вібрацій, ударів, дії агресивної промивальної рідини та високої зашламованості. Важкі умови експлуатації, які ще більше ускладнюються зі зростанням глибин та профілю свердловин, формують вимоги до ловильних пристроїв та їх магнітних систем.

Діаметр свердловини є одним із основних чинників, що визначає конструкцію магнітного ловильного пристрою. Щоб запобігати заклинюванню ловильного інструменту стовбуром свердловини, його зовнішній діаметр не повинен перевищувати 0,85-0,95 діаметра свердловини (рис. 1).

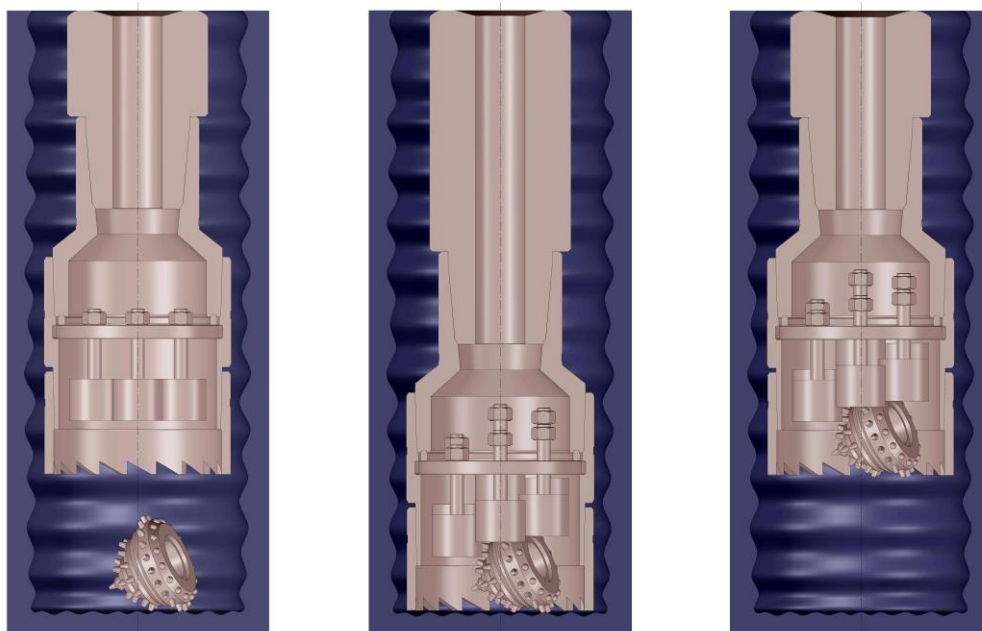


Рисунок 1 – Процес вилучення шарошки бурового долота ловильним пристроєм із рухомими магнітними системами

Ловильні роботи можуть виконуватися як у відкритому, так і в обсадженому стовбурі свердловини. Щоб уникнути притягання магнітного пристрою до стінок обсадної колони, необхідно концентрувати магнітне поле на робочій поверхні системи, запобігаючи будь-якому розсіюванню магнітних потоків на зовнішній поверхні корпусу.

Наявність у свердловині промивальної рідини може призвести до її потрапляння на місце контакту постійних магнітів та магнітопроводів, що відобразиться у зменшенні вантажопідіймальної сили пристрою. У випадку застосування обважнювача з феромагнітними властивостями ще на етапі спуску пристрою в свердловину залізні частинки можуть притягуватися до магнітної системи та призводити до зменшення силових характеристик. На сьогодні для приготування обважненого бурового розчину зазвичай використовують барит. Отже, магнітні системи ловильних пристроїв повинні бути герметичними та не допускати потрапляння промивальної рідини всередину системи.

Розташування аварійних предметів на вибої свердловини є випадковою величиною, їхня геометрична форма, розміри та маса досить різноманітні. Крім того, конструкційні матеріали для виготовлення свердловинного обладнання та інструменту (леговані сталі, чавуни, твердий сплав) володіють різними магнітними властивостями. Тобто ловильні пристрої повинні бути універсальними та вилучати предмети, що володіють слабкими феромагнітними властивостями.

Металеві предмети на вибої свердловини знаходяться у шарі шламу, утвореному із осаду гірської породи та металевого скрапу. Наявність шламу, товщина якого може досягати декількох метрів, перешкоджає безпосередньому контакту магнітної системи з аварійним предметом, внаслідок чого уловлювальна здатність пристрою зменшується. На особливу увагу заслуговує той факт, що в процесі буріння м'яких або середніх за твердістю гірських порід уламки можуть бути втиснуті в стінки свердловини або вибій. Враховуючи негативний вплив шламу, в магнітних системах ловильних пристроїв потрібно передбачити промивальні отвори. Промивальна рідина охолоджує магнітну систему, що дає можливість експлуатувати ловильний пристрій за температури на вибої дещо вищої за робочу температуру постійних магнітів.

Під час виконання спуско-підйомних операцій виникають вібрації та удари магнітних пристроїв до виступів у стінках свердловини або до обсадної колони. Тому варто обмежувати максимальні швидкості спуску магнітних пристроїв у свердловину. Статичні та динамічні навантаження призводять до розмагнічування магнітотвердих матеріалів, а також до руйнування окремих елементів магнітної системи та пристрою загалом. Зважаючи на це, магнітна система повинна бути захищена від можливих механічних пошкоджень та володіти достатньою міцністю і жорсткістю конструкції.

Постійне збільшення глибин буріння нафтових і газових свердловин призводить до під-

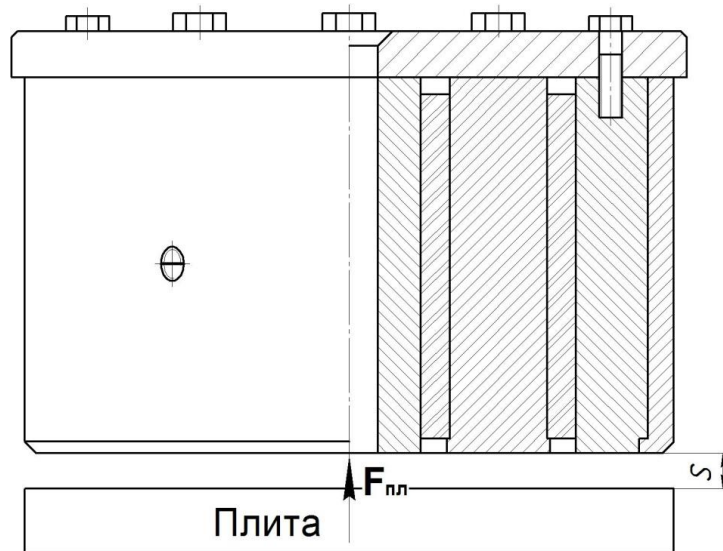


Рисунок 2 – Схема визначення зусилля притягання плити

вищення температури на вибої. Відомо, що дія високих температур чинить негативний вплив на стабільність постійних магнітів, що може призвести до їх розмагнічування. Тому, важливо дослідити залежність вантажопідіймальної сили від температури на вибої свердловини.

Раніше проведеними дослідженнями [12] обґрунтовано доцільність застосування рідкісноземельних неодимових постійних магнітів у системах ловильних пристроїв, попри те, що вони характеризуються невисокою максимальною робочою температурою – від 80 до 200 °С. У випадку її перевищення виникають незворотні зміни, які усуваються повторним намагнічуванням постійного магніту. Зворотні зміни параметрів постійних магнітів відбуваються в межах робочої температури і є функцією від температурних коефіцієнтів. Останні визначають зміну кривої розмагнічування під час теплового впливу на магнітотвердий матеріал. Температурні коефіцієнти магнітної індукції, коефіцієнта сили для магнітів Nd-Fe-B від'ємні та становлять $-(0,08-0,12)$ і $-(0,55-0,65)$ %/°С відповідно. Тобто, підвищення вибійної температури буде призводити до зниження магнітних параметрів системи та підіймальної здатності ловильного пристрою.

Важливо відзначити, що постійні магніти є складовими елементами магнітних систем, тому їх розмагнічувальний чинник дещо зменшується. Внаслідок цього, незворотні втрати магнітного потоку виникають за вищих температур. Визначити конкретні значення температур, за яких виникають незворотні зміни, можливо лише під час проведення теоретичних або експериментальних досліджень ловильних пристроїв.

З метою дослідження впливу температури на вантажопідіймальну силу ловильного пристрою проведено розрахунок магнітної системи в програмному середовищі ANSYS Electronics Desktop. Сила взаємодії магнітного поля системи з феромагнітною плитою розраховується за принципом віртуальної роботи. Згідно з рис. 2, зусилля притягання плити рівне похідній енергії магнітного поля по координаті робочого зазору:

$$F_{пл} = \frac{dW}{ds}, \quad (1)$$

де W – магнітна енергія системи, кДж/м³;
 s – робочий зазор, м.

Енергія магнітного поля системи визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H \, dV, \quad (2)$$

де V – об'єм простору, де діє магнітне поле, м³;

B – магнітна індукція, Тл;

H – напруженість магнітного поля, А/м.

Підставляючи (2) в (1), отримаємо формулу Максвелла:

$$F_{пл} = \frac{B^2 S_n}{2\mu_0}, \quad (3)$$

де S_n – робоча площа полюсів магнітної системи, м²;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна проникність вакууму, Гн/м.

Формула Максвелла дозволяє розрахувати вантажопідіймальну силу $F_{пл}$, що характеризує магнітну енергію в робочому зазорі. Проте, вираз (3) можна використовувати для розрахунку

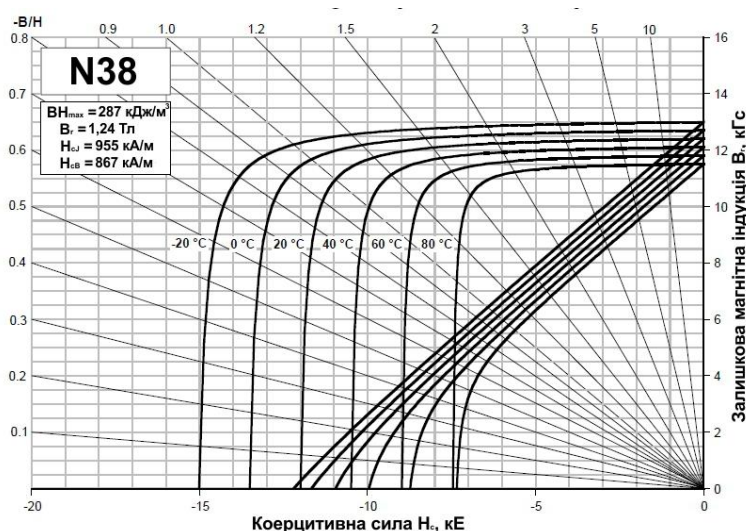


Рисунок 3 – Криві розмагнічування магніту марки N38 залежно від робочої температури

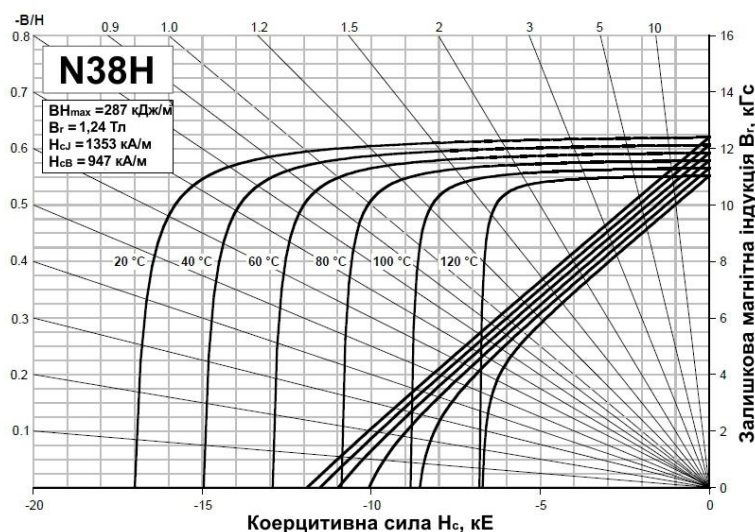


Рисунок 4 – Криві розмагнічування магніту марки N38H залежно від робочої температури

лише за умови однорідного магнітного поля в зазорі між магнітною системою та уловлюваним предметом, що на практиці не зустрічається. Тому силу притягання будемо знаходити за допомогою програмного комплексу ANSYS Electronics Desktop. На відміну від класичного методу віртуальної роботи, в процесі розрахунку $F_{пл}$ плита залишається нерухомою. Замість цього змінюються тетраедри, розміщені вздовж зовнішньої поверхні об'єкта. Таким чином, для обчислення сили потрібно здійснити розрахунок магнітного поля.

Варто зазначити, що під час розрахунків ANSYS Electronics Desktop враховує нелінійні властивості як постійних магнітів, так і магнітом'яких матеріалів. Відтак, енергія магнітного поля системи визначається за наступною залежністю:

$$W = \int_V \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dV. \quad (4)$$

Теоретичні дослідження проведено для ловильного пристрою із зовнішнім діаметром 115 мм. Магнітна система пристрою містить центральний та периферійний магнітопроводи циліндричної форми, між якими розміщені сегментні радіально намагнічені постійні магніти. Як магнітотвердий матеріал обрано неодимові магніти марок N38 та N38H з максимальною робочою температурою 80 °C та 120 °C відповідно. Задаємо вихідні дані для розрахунку, а саме: внутрішню криву розмагнічування постійних магнітів для температури 20 °C (рис. 3, 4) [13]. Зі зміною температури ANSYS автоматично перебудовує криві розмагнічування відповідно до температурної залежності за-

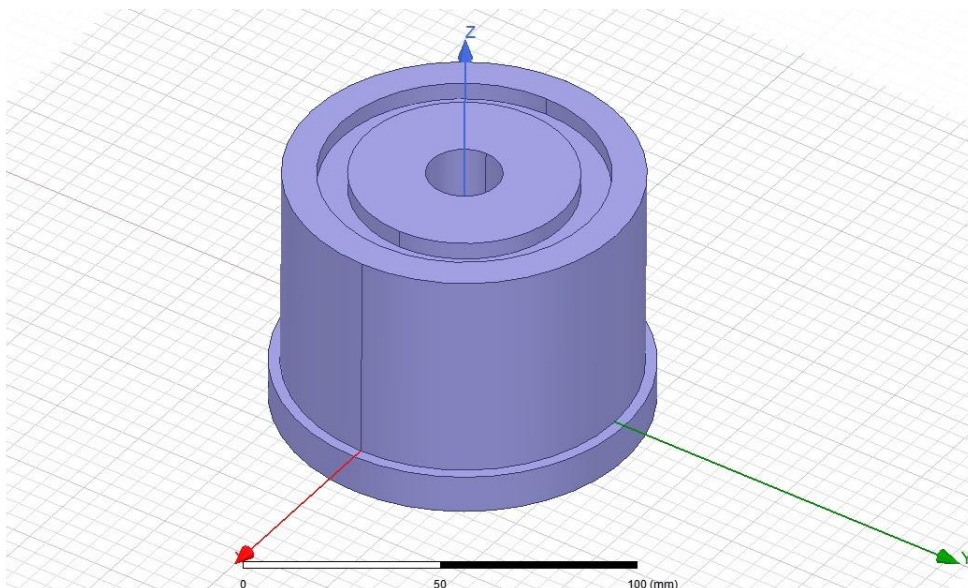


Рисунок 5 – Тривимірна модель магнітної системи

лишкової магнітної індукції та коерцитивної сили.

Тривимірну модель магнітної системи створено в середовищі програми Solid Works (рис. 5). Безпосередній розрахунок проводився методом скінченних елементів у ANSYS Electronics Desktop. Завдання знаходження сили притягання, що діє на феромагнітну плиту, вирішувалося для значень температури в межах від 20 °C до 150 °C із кроком 10 °C.

Аналізуючи отримані графічні залежності (рис. 6), бачимо, що сила притягання плити до магнітної системи зменшується на 5 % із досягненням робочої температури магнітів. Можна стверджувати, що це – прийнятний показник, адже після відновлення початкових умов вантажопідіймальна сила повертається до максимального значення. Проте, із перевищенням максимальної робочої температури постійного магніту зниження силових характеристик відбувається швидше. Так, для системи скомпонованої із магнітів з максимальною робочою температурою 80 °C із досягненням температури 120 °C вантажопідіймальна сила зменшується на 12 %, а за 150 °C – на 18 %. Досліджувана магнітна система ловильного пристрою призначена для роботи на глибинах до 5000 м, де вибірна температура може досягати 120 °C і більше. Використання магнітів марки N38 може призвести до їх часткового розмагнічування, а отже, зменшення силових параметрів системи. Результати розрахунку системи з магнітами марки N38H вказують на незначне зменшення сили 4,8 % із досягненням верхньої межі робочої температури (120 °C) та близько 8 % – за температури 150 °C.

Термостабільність постійних магнітів залежить від їх геометричної форми та розмірів. Наприклад, у пластинчастих магнітів з невеликою довжиною незворотні втрати магнітних властивостей відбуваються за нижчої від робочої температури. Це пояснюється тим, що магніти різних розмірів мають різні поля розмагнічування. Дослідження впливу високих температур на поведінку розмагнічування проведено для системи з магнітами довжиною 8 мм. Рациональну довжину постійних магнітів та інші геометричні співвідношення елементів магнітних систем визначено за методикою [14].

З метою встановлення впливу довжини постійного магніту на термостабільність магнітної системи проведено аналогічний розрахунок для систем з магнітами довжиною 4 мм та 6 мм марки N38. Отримані результати (рис. 7) вказують на дещо вище значення вантажопідіймальної сили в межах допустимих робочих температур для систем із меншою довжиною магнітів за рахунок більшої площі робочої поверхні магнітопроводів. Проте, із перевищенням робочої температури спостерігається різке зменшення сили для магнітів меншої довжини. Так, за температури 150 °C сила притягання зменшується на 23 % та 30 % для систем з магнітами довжиною 6 мм та 4 мм відповідно.

Використання в системах ловильних пристроїв постійних магнітів невеликої довжини дає можливість отримати дещо вищу вантажопідіймальну силу, проте суттєво зменшується термостабільність магнітної системи. З метою запобігання виникненню незворотних втрат магнітних властивостей рекомендовано в магнітних системах ловильних пристроїв застосо-

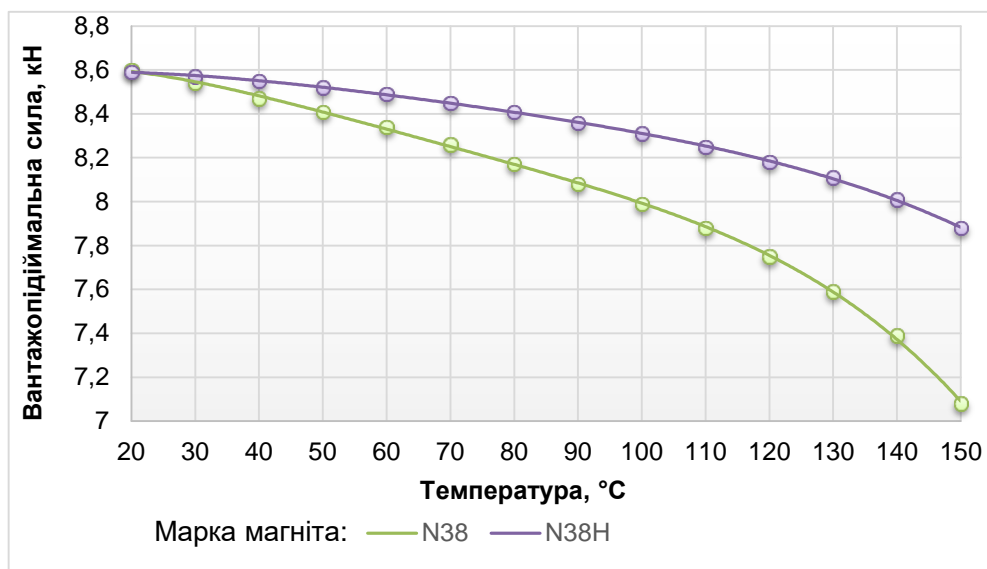


Рисунок 6 – Залежність вантажопідіймальної сили від температури для магнітних систем з різними марками постійних магнітів

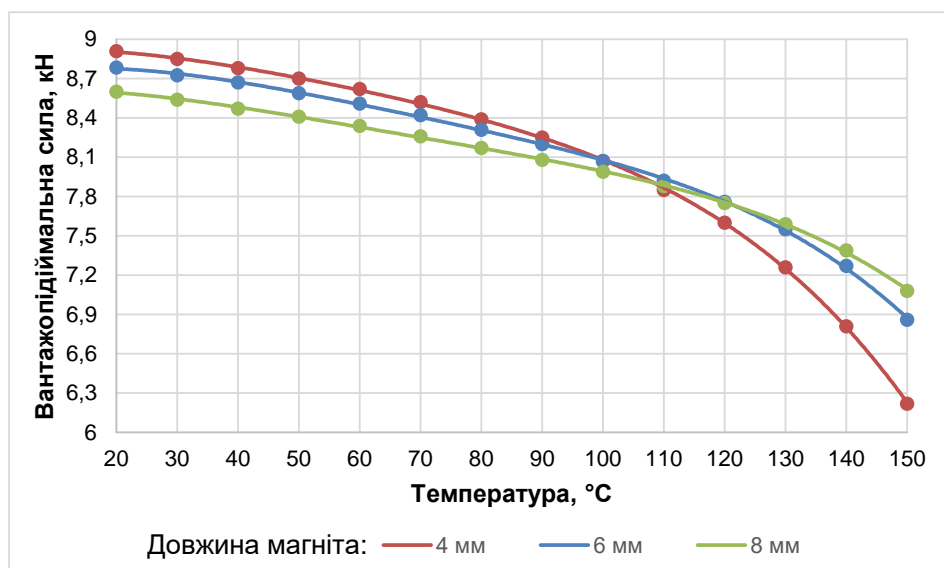


Рисунок 7 – Залежність вантажопідіймальної сили від температури для систем із різною довжиною магнітів

увати магніти з робочою температурою, виходячи від температури на вибої свердловини.

Висновки

1. На основі аналізу умов експлуатації магнітних ловильних пристроїв встановлено чинники, що впливають на процес уловлення металевих предметів, а саме: діаметр та конструкція свердловини, вібрації, удари, промивальна рідина, маса і форма аварійних уламків, високі тиски та температура. За умови дотримання технології проведення ловильних робіт та настанови з експлуатації ловильних пристроїв наведені фактори не чинять негативного впливу на процес очищення свердловин від феромагнітних уламків. Водночас, вони формують вимо-

ги до конструкції магнітних пристроїв, виконання яких зменшить витрати часу та коштів на ліквідацію аварійної ситуації в свердловині.

2. Досліджено вплив високих температур на силові характеристики магнітних систем ловильних пристроїв. Встановлено, що з досягненням верхньої межі робочої температури постійних магнітів силові характеристики систем зменшуються приблизно на 5%. За перевищення максимальної робочої температури зниження вантажопідіймальної сили відбувається значно швидше. Враховуючи незначне зменшення вантажопідіймальної сили досягненням робочої температури під час проектування магнітної системи потрібно передбачити на 10-15% більший магнітний потік.

3. Суттєвий вплив на термостабільність магнітних систем чинять геометрична форма та розміри постійних магнітів. У випадку застосування постійних магнітів невеликої довжини зменшення вантажопідіймальної сили становить 23 % та 30% для систем з довжиною магнітів 6 мм та 4 мм відповідно. Отже, ще одним важливим питанням під час проєктування магнітних систем є встановлення раціональних геометричних розмірів постійних магнітів та магнітопроводів.

Література / References

- Short J. A. Prevention, Fishing, and Casing Repair. Tulsa: PennWell Publishing, 1995. 559 p.
- Adkins C. S. Economics of Fishing. *Journal of Petroleum Technology*. 1993. Vol. 45, Iss. 05. P. 402–404. <https://doi.org/10.2118/20320-PA>
- Specialized Tools for Wellbore Debris Recovery / B. Coll, G. Laws, J. Jenpert, M. Sportelli, C. Svoboda, M. Trimble. *Oilfield Review*. 2012. Vol. 24, Iss. 4. P. 4–13.
- Johnson E., Land J., Lee M., Robertson R. Landing the big one – the art of fishing. *Oilfield Review*. 2012. Vol. 24 (4). P. 26-35.
- Douglas J. Fishing techniques for drilling operations. *Proceedings of AAPG Southwest Section Meeting*. Texas. USA. 1999. P. 15-24.
- Filho F., Filardo J. Machine Learning Applied on Fishing Occurrence Prediction. *Proceedings of Offshore Technology Conference Brasil*. Rio de Janeiro, Brazil. October 2019. <https://doi.org/10.4043/29700-MS>
- Elmgerbi A., Leš B., Ashena R., Atkin T. A Practical Decision Tool to Evaluate and Rank Potential Solutions for Expected Downhole Drilling Problems During the Well-planning Phase. *Journal of The Institution of Engineers*. 2022. Vol. 103 (1). P. 25-36. <https://doi.org/10.1007/s40033-021-00325-7>
- DeGeare J. The Guide to Oilwell Fishing Operations: Tools, Techniques, and Rules of Thumb. Gulf Professional Publishing, second ed. 2014. P. 213.
- Best Practices for Wellbore Cleanup and Displacements in Openhole Sand-Control Completions / M. Beldongar, D. Agee, A. Kumar, M. Offenbacher, N. Flamant, A. Lees, B. Gadiyar, M. Parlar. *SPE Drilling & Completion*. 2018. Vol. 33, Iss. 01. P. 1-11. <https://doi.org/10.2118/183888-PA>
- Connell P., Haughton D. B. Removal of Debris from Deepwater Wellbores Using Vectored Annulus Cleaning System Reduces Problems and Saves Rig Time. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas. October 9-12, 2005. Paper Number: SPE-96440-MS. <https://doi.org/10.2118/96440-MS>
- Haughton D. B., Connell P. Reliable and Effective Downhole Cleaning System for Debris and Junk Removal. *Proceedings of SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Adelaide, Australia. September 11–13, 2006. Paper Number: SPE-101727-MS. <https://doi.org/10.2118/101727-MS>
- Romanyshyn T. L. Obhruntuvannia vyboru materialiv postiinykh mahnitiv dlia lovylynykh prystroiv. *Rozvidka ta rozrobka nafto-?ykh i hazovykh rodovyshch*. 2013. No 1. P. 143-152. [in Ukrainian]
- DEXTER Magnetic Technologies. Material Grades. Neodymium Iron Boron Magnets URL: <http://www.dexteromag.com/material-grades/neodymium-iron-boron-magnets>.
- Romanyshyn T., Dzhus A., Romanyshyn L. Design and research of fishing tools with rational parameters of magnetic systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 4, Iss. 5 (88). P. 17-22. DOI: [10.15587/1729-4061.2017.108822](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108822).