

На правах рукопису

Романишин Тарас Любомирович



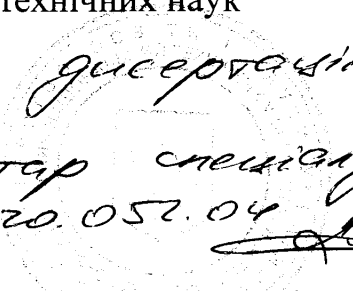
УДК 622.248.6:621.318.2

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ВИБОЇВ
НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ПРИСТРОЯМИ НА
ОСНОВІ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

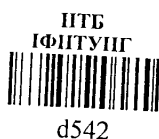
Спеціальність 05.05.12 – машини нафтової і газової промисловості

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

*Всі примірники дисертації ідентичні
за змістом.
З величчю секретар спеціалізованої
вченої ради Д 20.057.04*



Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Крижанівський Євстахій Іванович



Івано-Франківськ – 2014

d542

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМА ОЧИЩЕННЯ СВЕРДЛОВИН ВІД МЕТАЛУ В ПРОЦЕСІ ЇХ СПОРУДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ	9
1.1 Стан вибою свердловин під час буріння та аварійно- відновлювальних робіт.....	9
1.2 Аналіз аварійності під час спорудження та експлуатації свердловин	13
1.3 Аналітичний огляд магнітних ловильних пристроїв	18
Висновки до розділу 1.....	34
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ МАГНІТНИХ СИСТЕМ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ	35
2.1 Вимоги до магнітних систем і критерії оцінки їх ефективності	35
2.2 Обґрунтування вибору матеріалів елементів магнітних систем	41
2.3 Аналіз і синтез магнітних систем	50
Висновки до розділу 2.....	56
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ СИСТЕМ	58
3.1 Методи розрахунку магнітних полів систем ловильних пристроїв	58
3.2 Моделювання і розрахунок магнітних систем із раціональними геометричними параметрами	65
3.3 Визначення раціональних співвідношень елементів допоміжної утримувальної системи	78
3.4 Дослідження впливу температури на силові параметри магнітних систем	84
Висновки до розділу 3.....	87

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ	89
4.1 Методика і технічні засоби експериментальних досліджень	89
4.2 Дослідження розподілу магнітної індукції на робочих поверхнях магнітних систем	98
4.3 Визначення тягових характеристик систем ловильних пристроїв	106
Висновки до розділу 4.....	113
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ТА ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ МАГНІТНИХ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ	115
5.1 Розроблення магнітних пристроїв типу ПМЛ	115
5.2 Розроблення пристроїв із рухомою магнітною системою типу ФУМ	123
5.3 Кваліметричний аналіз магнітних ловильних пристроїв	127
5.4 Промислові випробування магнітних ловильних пристроїв	130
5.5 Перспективи вдосконалення магнітних ловильних пристроїв	137
Висновки до розділу 5.....	141
ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	145
ДОДАТКИ.....	157
Додаток А	158
Додаток Б	168

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення України власними енергоносіями неможливе без збільшення обсягів буріння геологорозвідувальних і експлуатаційних свердловин. Процес спорудження нафтогазових свердловин супроводжується періодичними відмовами та поломками бурового інструменту, в результаті чого на вибої залишаються різні за формою і масою металеві уламки. У зв'язку з виснаженням родовищ, використанням морально застарілої техніки щорічно зростає обсяг робіт із ремонту свердловин, під час проведення яких часто відбувається падіння інструменту і металевих уламків у свердловину [1].

Одним із найефективніших способів очищення вибоїв свердловин від стороннього металу є застосування магнітних ловильних пристроїв, що уловлюють феромагнітні предмети без їх попереднього руйнування. Різноманіття аварій та, як наслідок, аварійних металевих предметів на вибоях свердловин зумовлює широке використання магнітних пристроїв, незважаючи на існуючі недоліки. Відомі в Україні та за кордоном магнітні ловильні пристрої [2-6] характеризуються невисокою вантажопідіймальною силою внаслідок використання литих або керамічних магнітів, низькою надійністю під час уловлювання та вилучення із свердловини видовжених металевих предметів і швидким зношенням робочої поверхні магнітної системи.

За останній час відбулися значні зміни в технології виготовлення магнітотвердих матеріалів, що дало можливість розробити постійні магніти з рідкісноземельних матеріалів [7, 8]. Перспективним є застосування таких магнітів у системах ловильних пристроїв, що дасть змогу створити нові конструкції з суттєво вищими характеристиками.

У зв'язку з тим, що відомі пристрої не забезпечують якісне очищення вибою в процесі спорудження та ремонту свердловин, актуальним є завдання вдосконалення свердловинних ловильних пристроїв на основі постійних магнітів із рідкісноземельних матеріалів і визначення їх експлуатаційних характеристик.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота є складовою частиною планових державних науково-дослідних робіт, виконаних в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, а саме: Д-18-12-П "Розроблення методів управління процесом спорудження скерованих свердловин в сланцевих і вугільних відкладах" (№ ДР 0112U004157). У результаті виконання НДР одержано методи локалізації проблемних моментів, пов'язаних з аварійними роботами в скерованих свердловинах із вилучення металевих залишків у результаті руйнування елементів бурильного інструменту.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності очищення вибоїв свердловин від феромагнітних предметів пристроями на основі постійних магнітів із рідкісноземельних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні **завдання:**

- аналіз стану вибоїв свердловин у процесі буріння та ремонту;
- обґрунтування вибору магнітотвердих матеріалів і раціональних конструкцій магнітних систем;
- визначення раціональних геометричних співвідношень елементів систем та оцінка їх ефективності на основі моделювання систем із неодимових рідкісноземельних магнітів;
- удосконалення методу визначення тягових характеристик та експериментальні дослідження силових і магнітних характеристик ловильних пристроїв;
- розроблення конструкцій ловильних пристроїв підвищеної вантажопідіймальності та їх дослідно-промислові випробування.

Об'єкт дослідження. Процес взаємодії магнітного поля пристроїв на основі постійних магнітів із феромагнітними предметами у свердловині.

Предмет дослідження. Удосконалення пристроїв на основі постійних магнітів для очищення вибоїв свердловин від металу.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи використано методи фізичного моделювання для дослідження процесу очищення вибоїв свердловин від металевих предметів; метод скінченних елементів для побудови розрахункової моделі магнітної системи; основи теорії магнітного поля та магнітостатики для розрахунку магнітної системи; методи математичної статистики під час опрацювання результатів експериментальних досліджень і в ході проведення кваліметричного аналізу магнітних ловильних пристроїв.

Положення, що виносяться на захист:

- метод визначення раціональних геометричних співвідношень елементів магнітних систем, що дає можливість максимально використати енергію поля постійних магнітів;
- метод дослідження силових характеристик магнітних систем ловильних пристроїв.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- удосконалено модель процесу уловлювання феромагнітних предметів у тривимірній постановці та з урахуванням нелінійних властивостей матеріалів;
- вперше встановлено механізм взаємодії кільцевої магнітної системи, розміщеної ексцентрично, з корпусом, що дає можливість визначати раціональні геометричні розміри елементів системи для заданих силових параметрів;
- вперше створено математичні моделі магнітних ловильних пристроїв, що описують їх технічний рівень за показником питомої вантажопідіймальної сили.

Практичне значення одержаних результатів:

- удосконалено методика розрахунку магнітних систем, що дає можливість одержати раціональні геометричні розміри елементів систем;
- запропоновано метод експериментальних досліджень магнітних систем з метою визначення їх тягових характеристик;

– розроблено конструкцію броньової магнітної системи на основі постійних магнітів із рідкісноземельних матеріалів, в якій шляхом зменшення розсіювання магнітних потоків забезпечуються високі силові характеристики (патент № 99790) [9];

– запропоновано конструкцію пристрою з рухомою магнітною системою, що значно підвищує ефективність вилучення видовжених металевих предметів (патент № 100087) [10];

– проведено кваліметричний аналіз магнітних ловильних пристроїв, який дає змогу оцінити технічний рівень пристроїв на стадії розроблення і випробування дослідного зразка, прийняти обґрунтовані рішення щодо перспективної конкурентоспроможності;

– розроблено конструкції пристроїв 9-ти типорозмірів із нерухомими та рухомими магнітними системами, які за основним показником призначення – вантажопідіймальною силою в 1,5-6 разів перевищують відомі аналоги;

– проведено дослідно-промислові випробування розроблених пристроїв на підприємствах: ТОВ "Бурінтехсервіс", LOTOS Geonafta (Литва), ГПУ "Полтавагазвидобування", ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", які підтвердили ефективність їх роботи під час очищення свердловин від металевих предметів;

– результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі "Нафтогазового обладнання" ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ) під час проведення лабораторних занять із дисципліни "Машини та обладнання для видобутку нафти і газу", а також у підготовці спеціалістів та магістрів.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, що наведені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: встановленні визначального впливу на силові та магнітні характеристики магнітних систем геометричних співвідношень елементів систем та матеріалу постійних магнітів [11, 12]; аналіз властивостей сучасних магнітотвердих матеріалів та обґрунтування доцільності використання в системах ловильних пристроїв магнітів із рідкісноземельних матеріалів [13]; встановлення раціональних геометричних розмірів магнітних систем [14]; удосконалення

магнітної системи ловильного пристрою з високими силовими та магнітними характеристиками [15]; участь у розробленні фрезера-уловлювача з рухомою магнітною системою та магнітного уловлювача [9, 10, 16]; удосконалення методу визначення тягової характеристики магнітних систем та проведення експериментальних досліджень [17]; аналіз результатів дослідно-промислових випробувань пристроїв ПМЛ та ФУМ [18].

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідались та обговорювались на: XIII Міжнародній конференції "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения" (с.м.т. Морське, 2010), XIV Міжнародній конференції "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения" (с.м.т. Морське, 2011), Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика – 2011" (м. Івано-Франківськ, 2011), Міжнародній науково-практичній конференції "Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України" (м. Борислав, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів "Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012" (м. Івано-Франківськ, 2012), XVI Міжнародній конференції "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения" (с.м.т. Морське, 2013), Міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика – 2013" (м. Івано-Франківськ, 2013).

Публікації. За результатами дослідження по темі дисертації опубліковано 10 друкованих праць, з яких 5 статей у фахових виданнях (одна одноосібна та одна зарубіжна стаття, що входить до наукометричної бази даних SCOPUS), 3 – у матеріалах конференцій, 2 патенти України на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 114 найменувань, додатків. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 144 сторінках і містить 69 рисунків та 10 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 168 сторінок.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА ОЧИЩЕННЯ СВЕРДЛОВИН ВІД МЕТАЛУ В ПРОЦЕСІ ЇХ СПОРУДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Стан вибою свердловин під час буріння та аварійно-відновлювальних робіт

На сучасному етапі розвитку нафтової і газової промисловості важливе значення набувають проблеми технічного переоснащення, вдосконалення і впровадження нових технологій та проведення профілактичних заходів, спрямованих на попередження аварій під час буріння нафтових і газових свердловин.

Аналіз стану вибою у процесі буріння проведений Аванесяном В. С., Акоповим Е. А., Антамоновим С. І., Бревдо Г. Д., Гасановим А. П., Гусманом А. М., Курніковим Ю. О., Смирновим В. П., Стекляковим Б. Л., та іншими вченими [3, 19-26] дає можливість стверджувати, що у будь-яких свердловинах, поряд зі шламом, наявний металевий скрап різного походження, маси та форми. Особливо багато скрапу залишається у свердловинах після аварійно-відновлювальних робіт, а також під час забурювання бокових стовбурів. Встановлено [19], що за рекомендованої швидкості висхідного потоку промивальної рідини густиною 1160 кг/м^3 у свердловині забезпечується очищення вибою від металевих частинок густиною 7850 кг/м^3 та умовного діаметра до 2 мм. Частинки більшого розміру та густини (твердий сплав) за існуючої системи промивання не виносяться потоком промивальної рідини на поверхню, а супроводжують процес руйнування породи і є однією з причин виходу з ладу породоруйнівного інструменту.

Зі збільшенням обсягів спорудження похило-скерованих і горизонтальних свердловин, актуальним є питання винесення шламу з горизонтальних ділянок. Процес ускладнюється тим, що на цих ділянках

потік промивальної рідини спрямований перпендикулярно гравітаційним силам, що діють на частинки шламу, а також через ексцентричне розміщення бурильної колони. Суттєво впливає на ефективність очищення стовбура кут нахилу осі свердловини. Експериментальними дослідженнями встановлено [27], що в похило-скерованій свердловині за незмінної швидкості висхідного потоку кількість шламу, винесеного потоком промивальної рідини на денну поверхню, зменшується зі зростанням zenітного кута. Якщо кути нахилу осі свердловини від 20° до 40° – на поверхню виноситься близько 90 % шламу, якщо кути нахилу від 40° до 60° – не більше 50 % вибуреної породи, якщо zenітні кути від 60° до 85° – не більше 20 %. Для забезпечення ефективного очищення стовбура похило-скерованих і горизонтальних свердловин за zenітного кута понад 40° , необхідно збільшувати швидкість висхідного потоку промивальної рідини в 2-4 рази, порівняно з аналогічними умовами промивання вертикальних свердловин.

На сьогоднішній день на очищення вибою від шламу і скрапу та винесення їх на поверхню витрачається щонайменше 70 % загальної енергії, що використовується в процесі буріння свердловин [23].

Накопичення металу на вибої свердловин відбувається внаслідок взаємного руйнування породи і озброєння доліт, сколювання їх зубів, випадання елементів опор шарошкових доліт, падіння у свердловину сторонніх предметів.

На думку Акопова Е. А. [19], основною причиною швидкого зношування озброєння долота є не монолітна порода вибою, а абразивний осад, який знаходиться на вибої та складається з великих уламків гірських порід і дрібного металевго скрапу. За наявності таких предметів збільшується ударно-вібраційне навантаження на долото і, як наслідок, зменшується стійкість опори.

Проблема аварійної втрати значної кількості зубків особливо актуальна для доліт вітчизняного виробництва і виробництва країн СНД. На вибої залишається до 20 % зубків, а від 30 % до 50 % твердосплавного озброєння

сколюється навіть за дотримання режимів відпрацювання долота (рис. 1.1, а) [28]. Встановлено [22], що до 40 % виходів з ладу доліт відбувається внаслідок передчасного спрацювання і руйнування озброєння за роботоздатної опори (рис. 1.1, б).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Характерні ознаки спрацювання озброєння доліт з твердосплавним (а) та фрезерованим (б) озброєнням

Досліджено [20], що після кожної аварії з долотами найбільш розповсюджених розмірів на вибої залишається від 1,2 кг до 26,0 кг металу, а під час аварій з долотами із твердосплавними зубками, окрім того, ще від 0,9 кг до 2,7 кг твердого сплаву. Під час ліквідації аварій з використанням торцевих фрезерів на вибої залишається додатково ще від 1,0 кг до 2,0 кг твердого сплаву на кожний відпрацьований фрезер.

Іноді для руйнування шарошки використовують штирові долота, після чого на вибої залишається багато металу, тому сповільнюється поглиблення свердловини та є ймовірність виникнення нової аварії з долотом. При цьому на розбурювання шарошки одного долота витрачається два-три штирових долота високої вартості [29].

Про наявність у свердловині сторонніх, зокрема металевих, предметів судять за короткочасним заклинюванням інструменту в процесі буріння, за подряпинами на нижній частині бурильної колони, а також за станом

зовнішньої поверхні породоруйнівного інструменту (рис. 1.2).

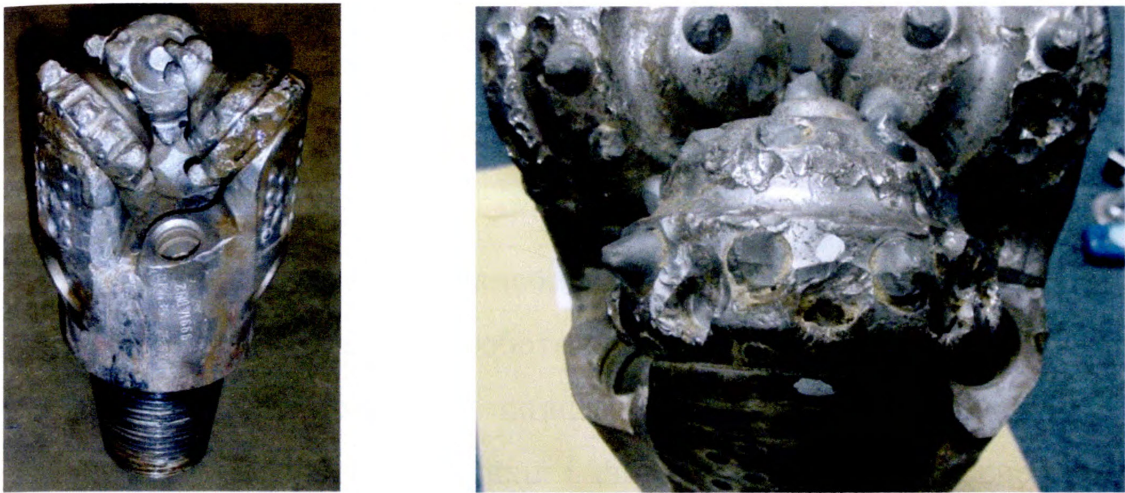


Рисунок 1.2 – Спрацювання доліт під час роботи по металу

Залежно від властивостей гірських порід, якості промивальної рідини, ступеня досконалості промивання, геометрії перекритої частини стовбура свердловини і низки інших чинників товщина шару крупного шламу, що осів у привибійній зоні свердловини, за існуючих способів буріння коливається в межах від 0,5 м до 25,0 м, а маса металевго скрапу в осаді становить від 0,21 кг до 2,28 кг [19].

Металеві частинки в осаді на вибої розподіляють на [19]:

- уламки, що залишилися на вибої внаслідок руйнування породоруйнівного інструменту в процесі буріння гірської породи, маса яких становить в середньому від 0,2 кг до 0,44 кг на свердловину;

- уламки, що залишилися на вибої у випадку руйнування бурильного інструменту торцевими фрезерами або іншими інструментами (від 2,5 кг до 3,5 кг). Під час руйнування сторонніх металевих предметів на вибої шаршковим долотом воно втрачає частину своїх зубків, за рахунок чого маса скрапу збільшується на 5-10 %. Після подрібнення металевих предметів торцевим фрезером на вибої залишається скрап масою від 75% до 85% маси цілого предмету, який не виноситься до гирла свердловини, а супроводжує процес буріння;

– металеві предмети, що впали на вибій з гирла свердловини через недбалість бурової бригади: кувалди, сухарі від бурових ключів, болти, гайки, обривки дроту талевого канату і т. п.;

– металеві уламки стоп-кільця, зворотного клапана, направляючого башмака колони, що залишилися на вибої після розбурювання цементного каменя в обсадних колонах або калібрування колони (від 18 кг до 40 кг).

Наявність на вибої свердловини перелічених вище предметів знижує темп її поглиблення, показники роботи доліт і призводить до аварій з ними.

Отже, одним із важливих чинників підвищення техніко-економічних показників поглиблення свердловини і зниження аварійності є систематичне очищення вибою від шламу та металевих предметів, що залишилися у свердловині під час аварій та безпосередньо в процесі буріння.

1.2 Аналіз аварійності під час спорудження та експлуатації свердловин

У процесі буріння та експлуатації, а також під час проведення підземного і капітального ремонту нафтових і газових свердловин виникають аварії. Під аварією потрібно розуміти порушення технологічного процесу спорудження та експлуатації свердловин, викликаного прихопленням або поломкою, із залишенням у свердловині інструменту, елементів колони труб або інших предметів, для вилучення або ліквідації яких необхідне проведення спеціальних робіт [30-34].

Загалом аварійно-відновлювальні роботи складають 10-12 % від часу, який витрачається на спорудження свердловин [32]. Здебільшого факти аварій та ускладнень приховуються, тому їх кількість, витрати часу і коштів на ліквідацію значно більші за офіційні дані.

Аварії, що виникають під час буріння свердловин, поділяють на вісім груп [29, 31-36]. Така класифікація необхідна для зручності аналізу та розроблення заходів з попередження і ліквідації аварій.

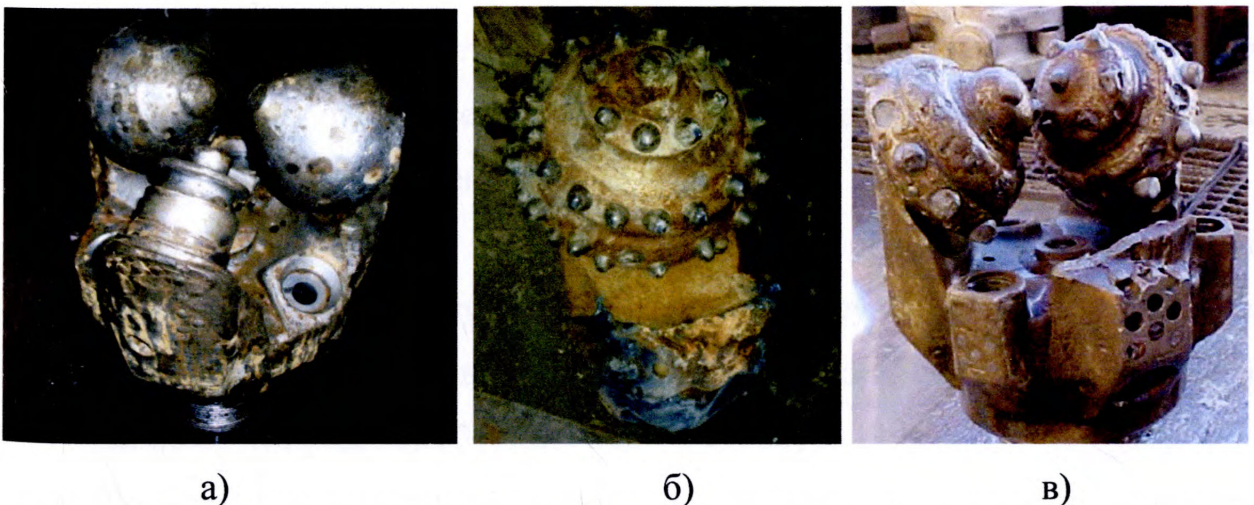
Аварії з бурильною колоною – це залишення у свердловині її елементів або частин (ведучих, бурильних і обважнених бурильних труб, перехідників, муфт, замків, центраторів, амортизаторів, калібраторів і т.д.).

Прихоплення колони бурильних і обсадних труб – непередбачена втрата рухомості колони труб внаслідок прилипання під дією перепаду тиску, в результаті осипання гірських порід або осідання шламу, а також через утворення сальника. Прихоплення – один з найпоширеніших, складних і затратних видів аварій в бурінні.

Аварії з породоруйнівним інструментом – залишення у свердловині долота, бурильної головки або їх елементів і частин.

Причинами поломок доліт є буріння з навантаженнями, що перевищують допустимі; удар долотом до вибою або уступу; розбурювання порід долотами, що не відповідають їх твердості; недостатня міцність опор, зварних швів; заклинювання шарошок; дефекти нарізання різьби; робота долотами по металі.

Аналіз даних експлуатації тришарошкових бурових доліт [37] виявив часте заклинювання опор і руйнування шарошок, внаслідок чого на вибої залишаються елементи тіл кочення опор, шарошки або цілі секції (рис. 1.3).



а – руйнування опори та зношення озброєння; б – відрив лапи з шарошкою;
 в – злом лапи

Рисунок 1.3 – Види поломок доліт

Для шарошкових доліт із твердосплавним озброєнням характерними є сколювання зубків та їх випадання, що може призвести до заклинювання шарошки, прискореного зношування і руйнування інших елементів озброєння [28].

Відгвинчування долота відбувається внаслідок порушення правил кріплення або спуску. На вилучення цілих доліт із свердловини витрачається в 12-20 раз більше часу, ніж на вилучення їх елементів [19].

Аварії з алмазними долотами – відрив матриць, поломка секторів і викришування з них алмазів, заклинювання доліт під час спуско-підіймальних операцій і буріння, відгвинчування доліт. Алмази, що випали, викришують інші алмази в долоті, що може призвести до його цілковитого руйнування. Найчастіше причинами виходу з ладу алмазних доліт є їх робота по металу, який не виноситься на поверхню промивальною рідиною. Тому, експлуатація алмазних доліт забороняється без належного очищення вибою від металу магнітними пристроями [38, 39].

Аварії з лопатевими долотами – відгвинчування долота, злам лопаті долота, поломка корпусу. Лопаті ламаються в результаті нещільного приєднання до корпусу або внаслідок заклинювання долота, викликаного невідповідним режимом його роботи на вибої.

Аварії під час кріплення свердловини виникають через падіння окремих обсадних труб і секцій колон у свердловину, зминання обсадних колон, а також невдале цементування [29].

Аварії з вибійними двигунами – це залишення у свердловині турбобурів, гвинтових двигунів, електробурів, їх вузлів внаслідок поломок або розкручування в різьбових з'єднаннях. Такі аварії складні в ліквідації і часто виникає необхідність буріння нового стовбура [29].

До аварій з падінням у свердловину сторонніх предметів належить падіння вставок ротора, роторних клинів, механічних ключів, кувалд, вузлів пневматичних бурових ключів, ручних інструментів, різноманітних пристроїв тощо. Якщо у свердловині знаходиться бурильна колона, падіння

предметів може призвести до її прихоплення.

До інших аварій зараховують аварії із залишенням у свердловині геофізичних або інших приладів, аварії з випробувачами пластів на трубах або каротажному кабелі тощо.

Аналіз показників аварійності під час буріння геологорозвідувальних та експлуатаційних свердловин на площах БУ "Укрбургаз" за період 1992-2007 рр. виявив, що майже 85 % всіх аварій припадає на аварії з елементами бурильної колони та прихоплення (рис. 1.4) [40]. Частка решти аварій змінюється за роками, але не перевищує 15-20 %. Зростання за останні роки аварійності з бурильною колоною та її елементами відбувалось внаслідок збільшення обсягу буріння глибоких похило-скерованих і горизонтальних свердловин, тобто за більш важких умов експлуатації. Відсутність аварій з вибійними двигунами пояснюється низькою часткою буріння свердловин даним методом – 7-8 % на початку 90-х років і близько 3 % у теперішній час [40]. Варто зазначити, що раніше аварії з долотами складали понад 10 % від загальної аварійності, на даний час кількість аварій зменшилася до 3-4 %. Це пояснюється збільшенням обсягів впровадження доліт із високою стійкістю опор і озброєння, зокрема виробництва американських компаній, а також підвищенням якості доліт російського та українського виробництва.



Рисунок 1.4 – Розподіл аварій за видами

Зазначимо, що більшість аварій на площах БУ "Укрбургаз" (63 %) трапилася з вини бурової бригади, 7 % з вини заводу-виготовлювача, решта з інших причин.

У зв'язку з виснаженням нафтогазових родовищ, використанням морально застарілої техніки та інструменту, обсяг робіт з поточного і капітального ремонту свердловин щорічно зростає [1]. Частина цих робіт припадає на ловильні операції з використанням магнітних пристроїв. Тому підвищення якості ремонтних робіт є актуальною проблемою для нафтогазових підприємств.

Ліквідація аварій у свердловинах – найбільш трудомісткий процес зі всіх видів робіт, які виконують бригади капітального і підземного ремонту свердловин (КіПРС). Часто під час ловильних робіт у свердловинах виникають додаткові ускладнення й аварії. При цьому знижуються темпи відновлення свердловин, а інколи вони повністю ліквіднуються [5].

Найбільша кількість аварій і ускладнень виникає за механізованого способу видобування нафти [5]. До 90 % усього фонду діючих вітчизняних свердловин експлуатується цим способом. Тому обсяг робіт із ліквідації аварій має тенденцію до збільшення.

Найхарактерніші види аварій під час експлуатації свердловин [5]:

- прихоплення і поломки насосно-компресорних труб під час підймання на поверхню пластового флюїду або подачі у свердловину рідини або газу;

- прихоплення і поломки бурильних труб, що використовуються під час капітального ремонту свердловин, у тому числі із зарізанням і бурінням другого стовбура;

- прихоплення пакерів;

- аварії, в результаті яких у свердловинах залишаються відцентрові насоси або їх елементи, насосні штанги або свердловинні насоси, геофізичні прилади і пристрої для дослідження свердловин і пластів, дріт, канат, кабель, а також пакери.

d542

Вказані класифікації аварій у процесі спорудження та експлуатації свердловин дають можливість розробляти заходи щодо їх попередження, проектувати необхідний ловильний інструмент, науково обґрунтовано і кваліфіковано вибирати технічні засоби для ремонту, раціонально використовувати наявний парк інструменту, полегшити завдання комплексного створення ремонтної техніки свердловини.

Важливими напрямками запобіганню аварій є проведення профілактичних робіт у свердловинах, використання ефективного бурового інструменту, впровадження сучасних інноваційних технологій, використання систем контролю керування процесом буріння.

Для ліквідації аварій необхідно забезпечити бурові бригади та бригади КіПС відповідним ловильним інструментом [41, 42], дотримуватися порядку проведення ловильних робіт [43].

Тому, важливим питанням є вдосконалення і розроблення ефективного ловильного інструменту, що дасть можливість якісніше та з меншими витратами проводити ловильні роботи у свердловинах.

1.3 Аналітичний огляд магнітних ловильних пристроїв

Аварії, що виникають у процесі спорудження та експлуатації свердловин характеризуються великою різноманітністю, в результаті на вибої залишаються різні за формою та масою металеві уламки [3, 30, 31]. Ефективність ліквідації аварії визначається в першу чергу правильним вибором ловильного інструменту. Використання невідповідного інструменту призводить до ускладнення аварії або ж навіть до ліквідації свердловини [44].

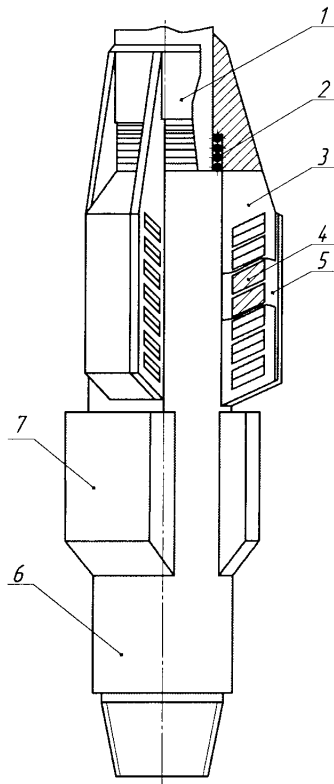
Для вилучення із свердловини аварійних предметів без їх попереднього руйнування застосовують ловильний інструмент, який за конструкцією та принципом дії поділяється на механічний, гідравлічний, магнітний та їх комбінації.

Механічні ловильні пристрої використовують для вилучення великих металевих предметів. Вони володіють високою вантажопідіймальною силою та прості в експлуатації. До механічних ловильних пристроїв відносяться павуки, фрезер-павуки, шліпси, мітчики, дзвони, трубоуловлювачі та інші. Залежно від способу вилучення металевих предметів і уламків вони поділяються на захоплюючі та нарізні. Захоплюючі механічні уловлювачі найбільш ефективні для вилучення із свердловин обірваних або прихоплених бурильних та обсадних труб, вибійних двигунів [31]. Нарізні пристрої уловлюють предмети за нарізану на їх внутрішній або зовнішній поверхні різьбу. Проте, пристрої механічної дії ненадійні в роботі, оскільки через низьку спроможність захоплення та утримання предметів потрібно декілька разів опускати інструмент для очищення вибою.

Гідравлічні ловильні інструменти поділяються на гідродинамічні та гідромагнітні. Вони призначені для очищення свердловин від породи і дрібних металевих предметів. Принцип роботи пристроїв полягає у взаємодії потоку промивальної рідини з уламками металу та винесенні їх із вибою свердловин у пастки уловлювача.

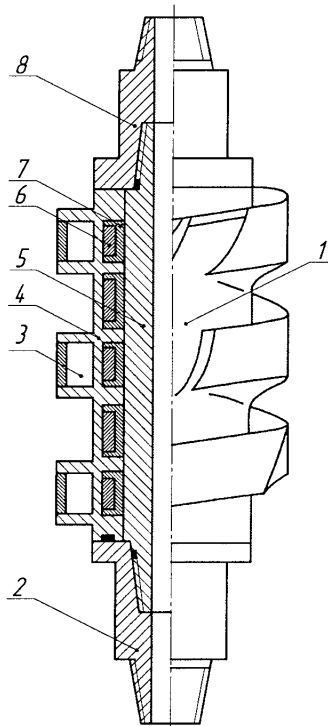
Найпоширенішими пристроями гідродинамічної дії є шламометалоуловлювачі (ШМУ), призначені для очищення вибою свердловини від металу та шламу. Ефективність роботи ШМУ визначається режимом течії у затрубному просторі та швидкістю висхідного потоку промивальної рідини (не менше 1 м/с). Недоліками пристроїв є швидке заповнення камери шламом та обмежена здатність уловлювання твердосплавного оснащення долота і великих металевих частинок. Їх доцільно використовувати як в процесі буріння, так і під час ліквідації аварій в компоновці з магнітним або торцевим фрезером [41].

У пристроях гідромагнітної дії вилучення металевих предметів здійснюється шляхом сумісної дії магнітних і гідравлічних сил. До пристроїв гідромагнітної дії можна віднести металоуловлювач (рис. 1.5) та ловильний пристрій (рис. 1.6).



1 – втулка; 2 – пружина; 3 – пластина; 4 – постійний магніт;
5 – лопаті; 6 – корпус; 7 – камера

Рисунок 1.5 – Металоуловлювач



1 – спіралеподібні канали; 2, 8 – перехідники; 3 – пастка; 4 – корпус;
5 – шпindelь; 6 – кільцевий магніт; 7 – екрануюча обойма;

Рисунок 1.6 – Ловильний пристрій

Металоуловлювач (рис. 1.5) [45] під час буріння обертається разом із долотом і може виконувати функції центратора або калібратора. Важкі частинки, що рухаються у висхідному потоці промивальної рідини переважно в периферійній зоні свердловини, наближаються до лопатей та притягуються магнітами. Втулка здійснює осьове переміщення відносно корпусу і лопатей, що дає можливість періодично очищувати магніти від уловленого металу. Недоліками цього пристрою є обмежений час перебування частинок у магнітному полі, швидке заповнення камер породою, а також недостатня площа контакту магнітної системи з уловленими частинками металевго скрапу, що призводить до їх відривання від магніту під час підймання бурильної колони. Наявність пружини і різьбових з'єднань знижує технологічність пристрою.

Ловильний пристрій (рис. 1.6) [46] призначений для очищення промивальної рідини у свердловині від металевих і твердосплавних частинок шламу. Висхідний потік промивальної рідини захоплює із вибою уламки металу і рухається спіралеподібними каналами, завдяки цьому збільшується час перебування частинок у магнітному полі. Під час обертання пристрою металеві частинки потрапляють у проміжки між сусідніми по висоті пастками, вдаряються до дна вищої із них та, потрапляючи під дію магнітних сил постійних магнітів, захоплюються в кишені пасток. Великі потоки розсіювання магнітного поля не дають можливості створити у порожнині пасток магнітний потік, необхідний для уловлення феромагнітних частинок.

Магнітні ловильні інструменти використовуються для вилучення із вибоїв свердловин металевих предметів, що володіють феромагнітними властивостями без їх попереднього руйнування. Принцип дії магнітних пристроїв абсолютно відрізняється від інших ловильних інструментів і полягає у створенні магнітного поля, яке впливає на металеві предмети. Проведений огляд конструкцій вітчизняних і закордонних магнітних ловильних пристроїв дав змогу класифікувати їх за принципом дії, способом створення магнітного поля, конструктивним виконанням магнітної системи і типом магнітотвердого матеріалу (рис. 1.7).

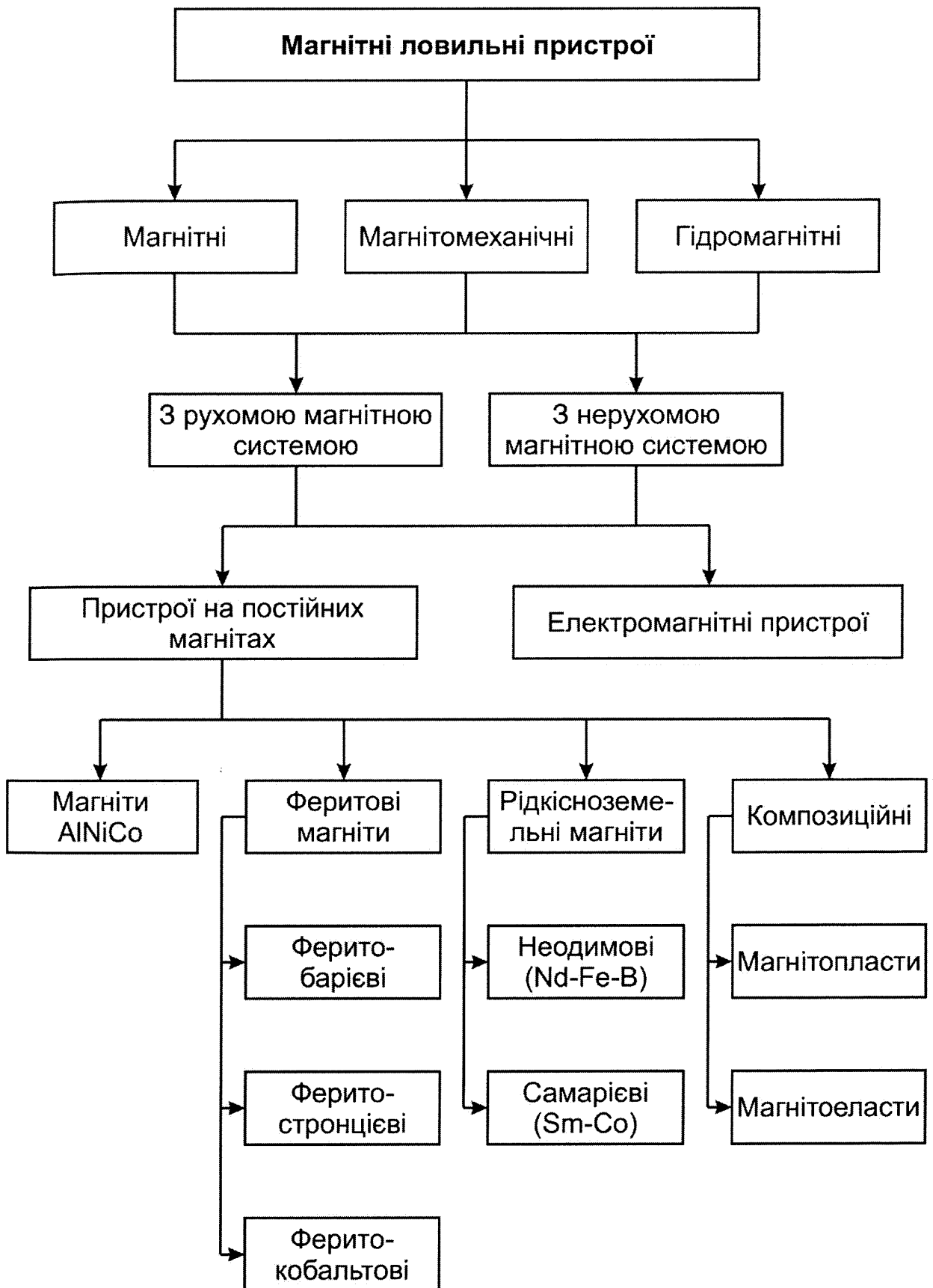


Рисунок 1.7 – Класифікація магнітних ловильних пристроїв

В електромагнітних пристроях живлення обмоток електромагніту відбувається від встановленого на поверхні електричного джерела через ретельно ізольований кабель або від акумуляторних батарей, розташованих всередині пристрою [3, 44]. Автономні та неавтономні джерела живлення мають низку недоліків, а саме складність проведення спуско-підіймальних робіт та низька потужність і надійність їх роботи. Окрім того, електромагнітні уловлювачі мають меншу вантажопідіймальну силу, ніж пристрої на постійних магнітах. Через вказані причини даний тип ловильних пристроїв не знайшов широкого практичного застосування, а з появою високоенергетичних постійних магнітів удосконалення електромагнітних пристроїв є безперспективним.

На сьогоднішній день використовують лише пристрої на постійних магнітах під час ловильних робіт, а саме очищенні вибою свердловини від феромагнітних предметів. Дані уловлювачі мають у 3-6 разів більшу вантажопідіймальність, ніж електромагнітні пристрої з аналогічними габаритами і масою [3].

Дослідженнями характеристик і розробленням конструкцій магнітних ловильних пристроїв займалися такі науковці: Акопов Е. А., Аношкін А. П., Гаврась В. А., Гасанов А. П., Гусман А. М., Кобилянський М. Т., Курніков Ю. О., Мязітов К. У., Пустовойтенко І. П., Романишин Л. І., Серенко І. А., Червінський В. П. та інші.

Поштовхом для розширення сфери застосування постійних магнітів у вантажопідіймальних пристроях стало розроблення у тридцятих роках ХХ століття сплаву альніко. Саме на його основі в СРСР, США та інших країнах були створені перші магнітні ловильні пристрої.

Так, у 1971 році в АзІНМаш (Азербайджан) були розроблені фрезери з постійними магнітами ФМ зі сплаву ЮНДК24 шести типорозмірів діаметрами від 145 мм до 394 мм. Вантажопідіймальна сила ловильних пристроїв знаходилась у межах від 0,5 кН до 1,8 кН. Створення нових магнітних матеріалів з кращими характеристиками, а також якісні зміни в

конструкції дали можливість освоїти з 1976 року серійний випуск магнітних фрезерів за ОСТ 26-16-1606-78 діаметрами від 86 мм до 315 мм з вантажопідіймальною силою від 0,4 кН до 12 кН [2, 30, 47].

Магнітні фрезери ФМ (рис. 1.8, а) розроблено на основі авторських свідоцтв [48, 49]. Магнітна система складається із декількох циліндричних магнітів марки ЮН14ДК25БА, розміщених у металевому стакані, що виконує роль магнітопроводу. Недоліками пристроїв є значні потоки розсіювання магнітного поля та втрата властивостей литих магнітів під час експлуатації і зберіганні. Відновлення характеристик магнітної системи здійснюється після трьох спусків пристрою у свердловину на намагнічуючих установках, які необхідно мати у розпорядженні бурових підприємств [30].

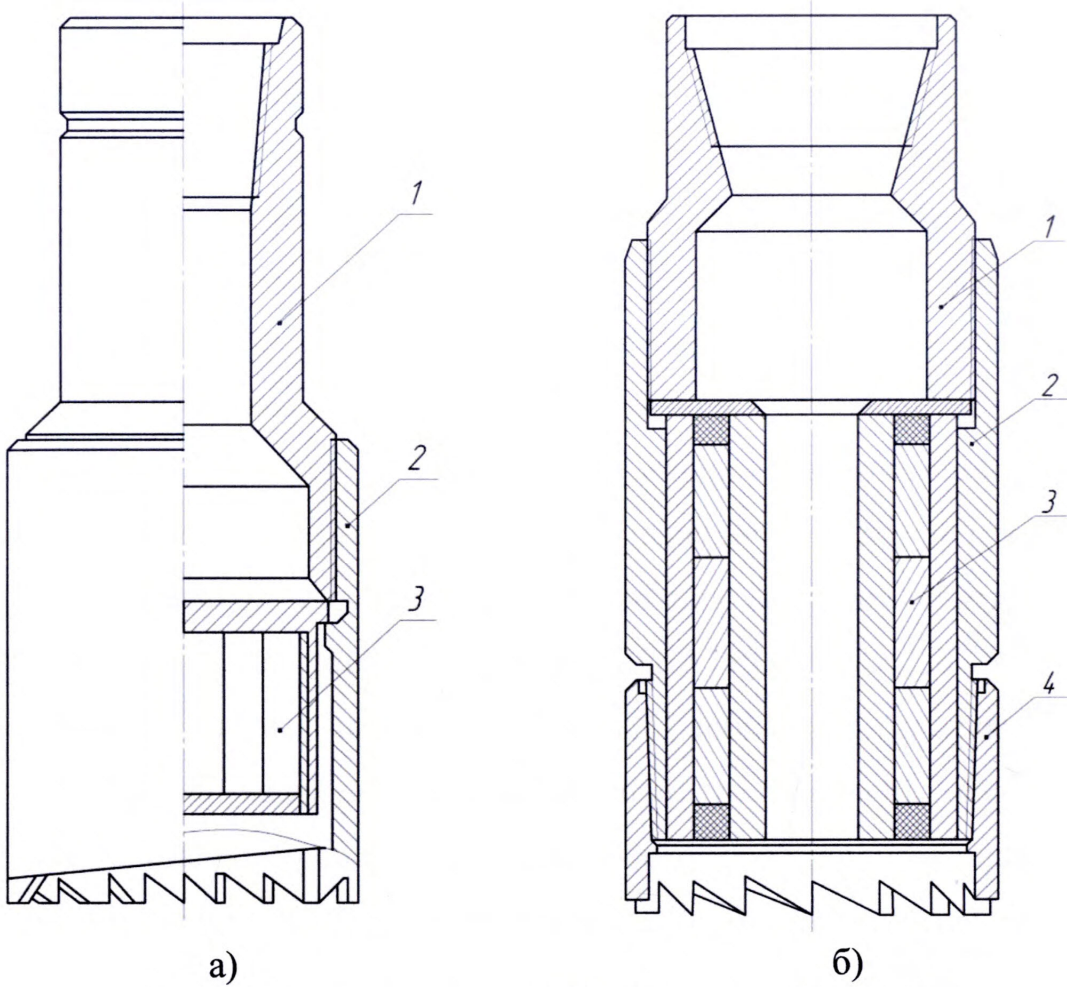
Один зі світових лідерів з виробництва ловильних інструментів – американська компанія “Bowen” також використовує у магнітних пристроях постійні литі магніти. Особливістю пристрою (рис. 1.9) є суцільний циліндричний магніт, розташований між двома полюсами. Намагнічування магнітної системи відбувається в зібраному стані. Вантажопідіймальна сила уловлювачів діаметрами від 3¹/₄ дюйма (82,5 мм) до 19 дюймів (482,6 мм) становить відповідно від 0,86 кН до 23 кН [6]. Використання литого магніту призводить з часом до зменшення вантажопідіймальної сили пристрою внаслідок його розмагнічування.

Подібну конструкцію мають румунські магнітні інструменти, що, залежно від зовнішнього діаметра, виготовляються у двох виконаннях:

- пристрої типу А із зовнішніми діаметрами від 38,1 мм до 177,8 мм володіють вантажопідіймальністю від 0,05 кН до 3,0 кН;

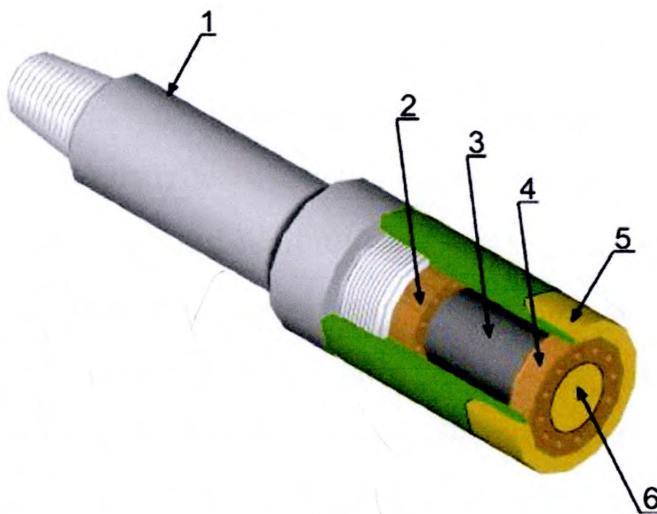
- пристрої типу В – із зовнішніми діаметрами від 203,2 мм до 355,52 мм та вантажопідіймальністю від 3,5 кН до 4,0 кН [50].

Загальними недоліками пристроїв з магнітними системами на литих магнітах є незначна вантажопідіймальна сила та схильність до саморозмагнічування, що призводить до втрати їх магнітних і силових характеристик під час експлуатації та зберігання.



а – фрезер-уловлювач типу ФМ; б – пристрій УОЗ-195
 1 – перехідник; 2 – корпус; 3 – магнітна система; 4 – коронка

Рисунок 1.8 – Магнітні ловильні пристрої



1 – перехідник; 2, 4 – промивальні пластини; 3 – постійний магніт;
 5 – коронка; 6 – полюс

Рисунок 1.9 – Магнітний уловлювач компанії “Bowen”

На базі систем із постійних феритових магнітів в ІФНТУНГ були розроблені пристрої для очищення вибоїв (УОЗ) свердловин від металу дев'яти типорозмірів із зовнішнім діаметром від 92 мм до 270 мм. Їх особливістю стала ефективна конструкція магнітної системи. Паралельне з'єднання постійних магнітів у системах забезпечило високу вантажопідіймальність шляхом концентрації магнітного потоку на робочій поверхні і практично відсутність магнітного поля на боковій циліндричній поверхні. Розроблені пристрої володіють умовною вантажопідіймальною силою від 2,6 кН до 19 кН, що в 2-3 рази перевищує показники магнітних фрезерів на основі сплаву альніко. У магнітних системах пристроїв УОЗ використовувалися феритові магніти марок 28БА190 та 22РА220 [3].

Загальний вигляд пристрою УОЗ-195 зображено на рис. 1.8, б. Магнітна система містить постійні магніти, розташовані між гранями центрального магнітопроводу, що має форму чотирикутної призми, та периферійних сегментних магнітопроводів. У верхній частині магнітної системи розташована шайба із немагнітного матеріалу, яка запобігає замиканню магнітних силових ліній на перехідник. У даному уловлювачі використані постійні феритові магніти марки 22РА220-1. Недоліком пристроїв УОЗ є невисока довговічність магнітної системи через швидке зношення робочої поверхні.

На сьогодні, в Росії потреби бурових і нафтогазовидобувних підприємств у магнітному ловильному інструменті задовольняє завод "Измерон", який здійснює серійний випуск магнітних фрезерів типу ФЛМ та ФМЗ [52]. Пристрої призначені для вилучення із свердловин предметів із феромагнітними властивостями, в тому числі виготовлених із твердого сплаву. Окрім того, магнітний фрезер ФМЗ містить механічний захоплювач для вилучення частин і деталей породоруйнівного інструменту та елементів бурильної колони. Вантажопідіймальна сила магнітних фрезерів знаходиться в межах від 1,5 кН до 10 кН для типорозмірів ФЛМ 80 – ФЛМ 315 [2, 53].

В ЗАО "ИНФРЕК" під керівництвом Аношкіна А. П. розроблено

універсальний інструмент, який може застосовуватися під час капітального ремонту свердловин – торцеву печатку-уловлювач ТПЛ [4, 54, 55]. Пристрій використовується з метою обстеження "голови" предмета, залишеного у свердловині, з одночасним його захопленням і вилученням із вибою. Особливістю конструкції ТПЛ (рис. 1.10) є змінна накладка, виготовлена з м'якого пластичного матеріалу (свинець, бітум, тугоплавкий церезин) і приєднана до робочої поверхні уловлювача, що дає можливість одержати відбиток залишеного у свердловині предмета. Магнітна система пристрою містить рідкісноземельні постійні магніти. Якщо необхідності одержати відбиток немає, ТПЛ використовується як звичайний магнітний уловлювач. У випадках, якщо вага аварійних предметів перевищує вантажопідіймальність ТПЛ, результатом спуску пристрою буде одержання відбитку. Типорозмірний ряд складають три пристрої із зовнішніми діаметрами корпусу від 114 мм до 132 мм та умовною вантажопідіймальністю від 3,5 кН до 5,5 кН [4, 55]. Недоліком уловлювачів ТПЛ є наявність робочого зазору між предметом і системою, створений прокладкою, що зменшує їх уловлювальну здатність.



Рисунок 1.10 – Загальний вигляд торцевих печаток-уловлювачів

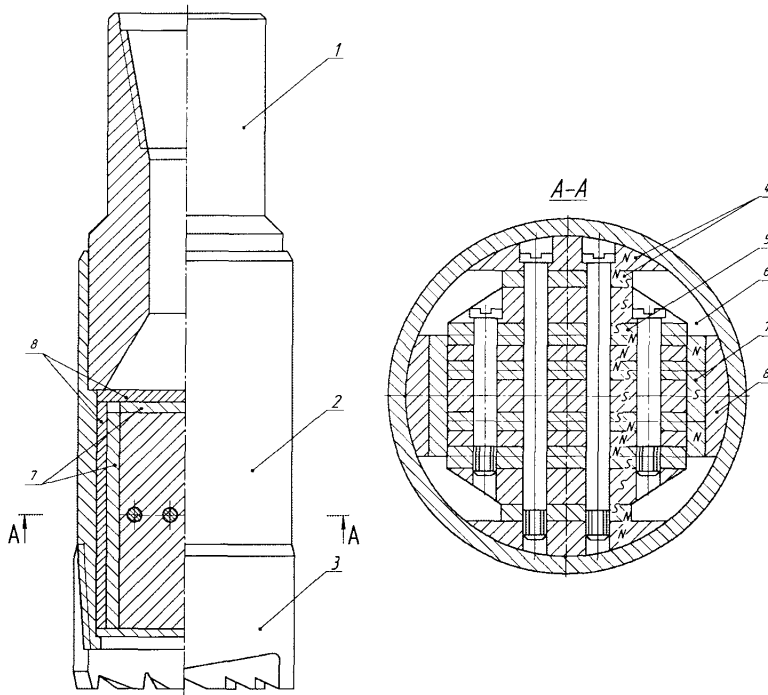
Також розроблені магнітні фрезери великого діаметра для роботи у відкритих стовбурах свердловин. Розрахункова підймальна сила становить відповідно 17 кН та 31 кН для фрезерів із зовнішніми діаметрами 210 мм та 285 мм [4, 54].

Спроба створення багатополусної системи на рідкісноземельних магнітах реалізована у магнітних пристроях, зображених на рис. 1.11, 1.12.

Магнітний уловлювач (рис. 1.11) [56] містить основну магнітну систему та допоміжні магніти і магнітопроводи, розміщені між корпусом і боковими торцевими площинами основної системи, а також над її неробочою поверхнею. Запропонована конструкція дає можливість використовувати постійні магніти і магнітопроводи раціональних геометричних розмірів. Проте, уловлювач має складне і нетехнологічне виконання основної магнітної системи, для якої характерне замикання магнітного потоку на допоміжних магнітопроводах та розсіювання поля в зазорах між корпусом і системою, що призводить до неефективного використання енергії постійних магнітів.

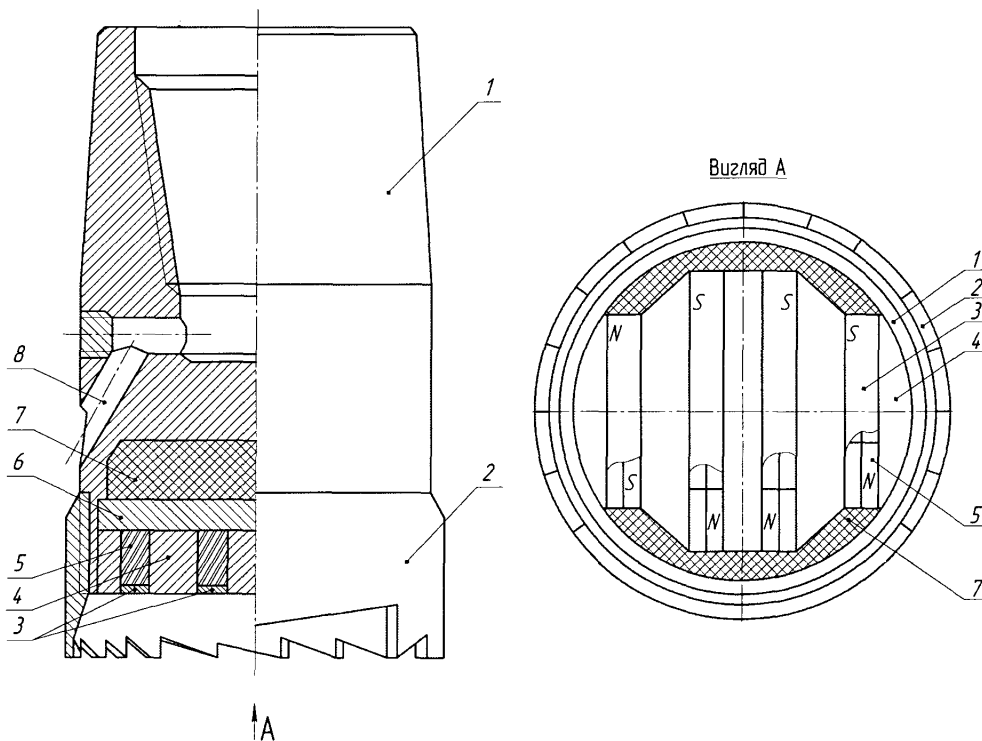
У магнітному уловлювачі (рис. 1.12) [57] підвищення питомої підйальної сили досягається шляхом використання в конструкції магнітної системи рідкісноземельних постійних магнітів, розміщених назустріч один одному за полярністю та закритих титановими екранами. Зменшення витрати постійних магнітів досягається за рахунок раціональної висоти магнітної системи та довжини магнітів. Відділення промивальних отворів від магнітної системи позитивно впливає на експлуатаційні характеристики і термін роботи, проте погіршує якість очищення вибою. Недоліком даного уловлювача є великі потоки розсіювання між корпусом і боковими торцевими поверхнями магнітопроводів протилежної полярності.

Розглянуті уловлювачі містять нерухому магнітну систему, недоліком якої є швидке зношення робочої поверхні та відрив уловлених видовжених предметів під час підймання інструменту внаслідок ударів до стінок свердловини. Підвищення надійності утримання таких предметів спостерігається у



1 – перехідник; 2 – корпус; 3 – коронка; 4, 5 – магнітні системи;
6 – промивальні канали; 7 – допоміжні магніти; 8 – допоміжні магнітопроводи

Рисунок 1.11 – Магнітний уловлювач

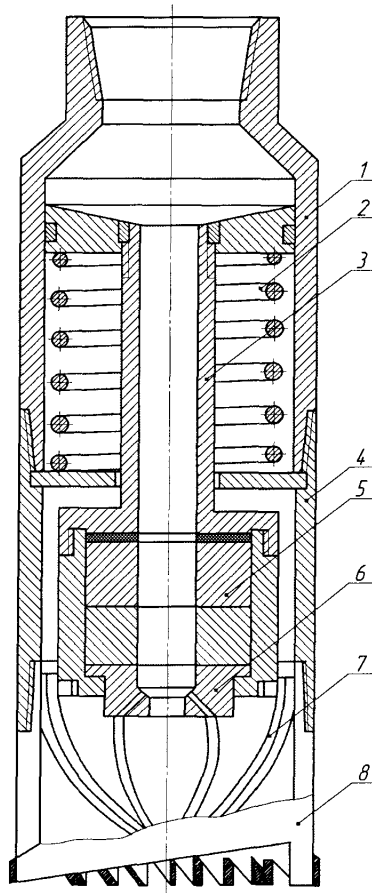


1 – корпус; 2 – коронка; 3 – екрани; 4 – полюси; 5 – постійні магніти;
6 – немагнітна плита; 7 – наповнювач; 8 – промивальні канали

Рисунок 1.12 – Магнітний уловлювач

пристроях магнітомеханічної та гідромагнітної дії, в яких система має можливість осьового переміщення для безпосереднього контакту з предметами.

До магнітомеханічних пристроїв з рухомою магнітною системою відноситься фрезер-павук (рис. 1.13) [58]. Під дією перепаду тиску промивальної рідини пружина стискається і магнітна система, розкриваючи пелюстки, переміщається вниз до контакту з уловлюваним предметом. Зі зниженням тиску пружина піднімає магнітну систему і займає початкове положення у корпусі, пелюстки при цьому стискаються та перекривають отвір у коронці, запобігаючи випаданню захоплених предметів. Магнітна система фрезера-павука внаслідок невисокої підіймальної сили не забезпечує уловлювання всіх металевих предметів, що знаходяться на вибої свердловини, а захоплені пелюстками дрібні предмети випадають через зазори між ними. Окрім того, пелюстки недовговічні у роботі.



1 – перехідник; 2 – пружина; 3 – патрубок; 4 – корпус; 5 – постійний магніт;
6 – наконечник; 7 – пелюстки; 8 – коронка

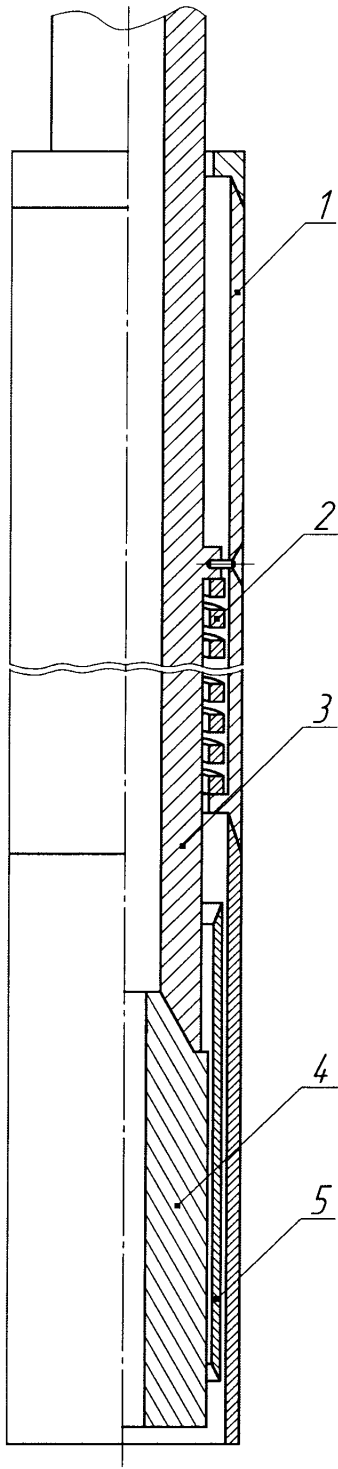
Рисунок 1.13 – Фрезер-павук

У ФРН розроблено пристрій з магнітомеханічним принципом захоплення для вилучення із свердловин втраченого бурового інструменту (рис. 1.14) [59]. Підвищення надійності винесення із свердловини уловлених металевих предметів досягається шляхом переміщення магніту під дією спіральної пружини з нижнього крайнього положення – в початковий період уловлювання, у верхнє – після захоплення предмету. Уловлені предмети від випадання з корпусу уловлювача затримує відбійна пружина. Проте, через незахищеність магнітної системи від механічних пошкоджень під час обертання та невисоку вантажопідіймальну силу, даний пристрій неефективний для проведення ловильних робіт.

Недоліками пристроїв магнітомеханічної дії є невисока надійність пружних елементів і задана висота переміщення системи, що не залежить від розмірів аварійних предметів.

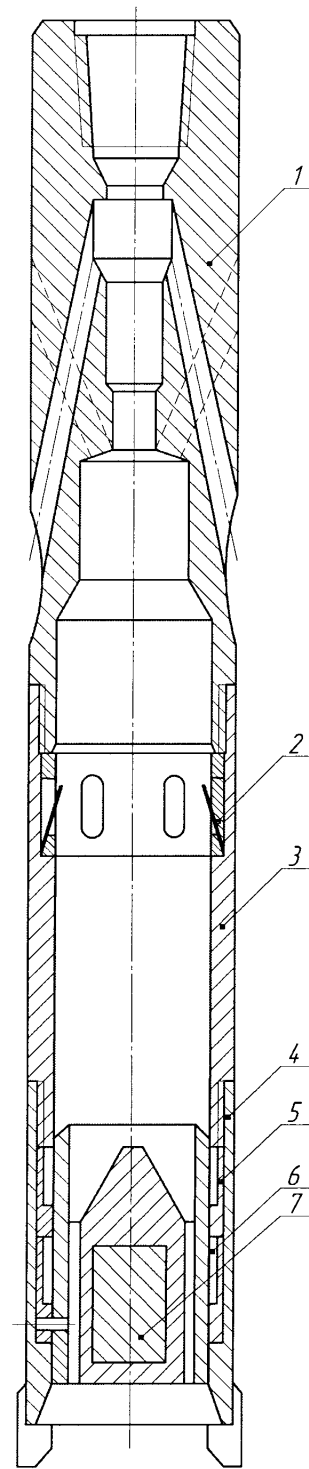
До ловильних пристроїв гідромагнітної дії з комбінованим принципом захоплення належить шламоуловлювач (рис. 1.15) [60]. Магнітна система піднімається у верхнє положення потоком промивальної рідини, який створюється завдяки зміні прямого промивання свердловини на зворотнє. Пелюстки захоплюючих пристроїв запобігають випаданню притягнутих до системи металевих предметів під час підймання пристрою. Залежність від режиму промивання свердловини, велика кількість пружних елементів, невисока вантажопідіймальна сила системи, через використання литих магнітів та зношення її робочої поверхні під час фрезерування, знижує надійність шламоуловлювача.

Загальними недоліками пристроїв з рухомою магнітною системою є складність конструкції та низька вантажопідіймальна сила, що становить 20-30 % вантажопідіймальності пристроїв з нерухомою системою. Через це неможливо за одну спуско-підймальну операцію вилучити із вибою свердловини великі металеві предмети, внаслідок чого широкого застосування дані пристрої не знайшли.



1 – корпус; 2 – пружина спіральна;
3 – труба; 4 – постійний магніт;
5 – пружина відбійна

Рисунок 1.14 – Магнітний пристрій
для вилучення втраченого бурового
інструменту



1, 3, 4 – секції верхня, середня та
нижня; 2 – пелюстки;
5, 6 – захоплюючі пристрої;
7 – магнітна система

Рисунок 1.15 – Шламоуловлювач для
вилучення сторонніх предметів із
свердловин

Аналіз ловильних пристроїв механічної, гідравлічної та магнітної дії дав можливість виявити переваги і недоліки кожного з них. Найефективнішими під час робіт із ліквідації аварій є магнітні ловильні пристрої, які уловлюють металеві предмети різної форми, розмірів, маси та положення на вибої. Відсутність потреби в попередньому руйнуванні металевих предметів пристроями магнітної дії значно скорочує тривалість проведення ловильних робіт.

Магнітні ловильні пристрої використовують для вилучення цілих та зруйнованих доліт, шарошок, лап із шарошками, лопатей, тіл кочення, втраченого озброєння доліт, у тому числі і твердосплавного, а також розширювачів, допоміжного інструменту і сторонніх предметів. Окрім того, вибій свердловини потрібно періодично очищати від дрібних металевих предметів, щоб зменшити ймовірність аварії та підвищити техніко-економічні показники буріння.

Різноманіття аварій та, як наслідок, аварійних металевих предметів на вибоях свердловин зумовлює широке використання магнітних пристроїв, незважаючи на існуючі недоліки. Основний із них – необхідність проведення декількох рейсів для вилучення металевих предметів. Кількість рейсів залежить від розмірів і маси залишеного на вибої металу. Ефективність роботи магнітних пристроїв знижується із вилученням предметів, що слабо володіють феромагнітними властивостями, такими як твердий сплав і чавунні уламки. У випадку використання пристроїв у глибоких і надглибоких свердловинах потрібно враховувати складні умови експлуатації.

Застосування альтернативних способів ліквідації аварії – руйнування предметів долотами або торцевими фрезерами дає змогу зекономити час на спуско-підймальні операції. Проте, залишені на вибої продукти руйнування сприяють виникненню наступних аварій та зменшують термін роботи доліт.

Таким чином, з метою задоволення потреб бурових і нафтогазовидобувних організацій у вискоелективних засобах очищення свердловин від металу, необхідно провести комплекс теоретичних і

експериментальних досліджень. Грунтуючись на отриманих результатах створити раціональні пристрої на основі постійних магнітів, що здатні забезпечувати якісне очищення вибою свердловини від металевих предметів з мінімальними витратами часу і коштів.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз стану вибою виявив, що практично в усіх свердловинах є технологічний осад чи зруйновані елементи бурового інструменту. Близько 20 % усіх видів аварій під час буріння та 30 % під час ремонту експлуатаційних свердловин зумовлюють залишення на вибої металевих предметів.

2. Встановлено, що з усіх видів ловильного інструменту найбільш ефективними є пристрої на основі постійних магнітів, які дають можливість вилучати із свердловин невеликі феромагнітні уламки без їх попереднього руйнування.

3. На основі аналізу існуючих конструкцій магнітних ловильних пристроїв здійснено їх класифікацію за основними ознаками та встановлено основні недоліки: невисока вантажопідіймальна сила, нераціональні конструкції магнітних систем і невисокий ресурс роботи.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ МАГНІТНИХ СИСТЕМ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Вимоги до магнітних систем і критерії оцінки їх ефективності

Ловильні пристрої на основі постійних магнітів повинні відповідати усім вимогам, що регламентують безаварійне проведення робіт із буріння, експлуатації та ремонту свердловин. Важкі умови експлуатації, які ще більше ускладнюються зі зростанням глибини свердловин, формують вимоги до ловильних пристроїв і магнітних систем.

Магнітні ловильні пристрої повинні уловлювати всі феромагнітні предмети, що знаходяться на вибої свердловин. Тому магнітні системи мають володіти максимально можливою вантажопідіймальною силою. Досягнути високих значень силових показників системи можна шляхом створення на поверхні магнітопроводів та в робочому зазорі потужного магнітного поля з максимальною індукцією до 2,13 Тл [61].

Діаметр свердловини є одним із основних чинників, що визначає конструкцію ловильного пристрою і системи. Для уникнення заклинювання ловильного пристрою стінками свердловини його зовнішній діаметр повинен становити 0,85-0,95 діаметра свердловини [62].

Стовбур свердловини, в якому проводяться ловильні роботи, може бути відкритим або обсадженим. Для запобігання притягання пристрою до стінок обсадної колони потрібно уникнути розсіювання магнітних потоків на зовнішній поверхні корпусу і сконцентрувати магнітне поле на робочій поверхні системи.

Форма, маса і розміщення залишених у свердловині предметів доволі різноманітні. Також, матеріали аварійних предметів (леговані сталі, чавуни, твердий сплав) володіють різними магнітними властивостями. Це означає, що ловильні пристрої повинні бути універсальними, тобто вилучати

предмети, які слабо володіють феромагнітними властивостями.

Металеві предмети на вибої свердловини переважно заходяться у шарі шламу, товщина якого може досягати декількох метрів [19]. Під час буріння м'яких або середніх за твердістю гірських порід уламки можуть бути втиснуті в стінки свердловин або вибій. Наявність на вибої шламу перешкоджає уловленню феромагнітних предметів, тому в магнітних системах необхідно передбачити промивальні отвори, сумарна площа поперечного перерізу яких не повинна створювати додаткових гідравлічних опорів. Витрата промивальної рідини для забезпечення виносу шламу на поверхню залежить від діаметра свердловини і становить від $0,012 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,036 \text{ м}^3/\text{с}$ [32]. Промивальна рідина охолоджує магнітну систему, що дає можливість експлуатувати ловильний пристрій за температури на вибої дещо вищій, ніж робоча температура постійних магнітів.

Для уловлення феромагнітних предметів необхідно досягнути їх безпосереднього контакту з робочою поверхнею системи. За наявності зазору між предметами та системою необхідно створити магнітне поле, достатнє для притягання уламків. Залежність зусилля притягання від робочого зазору характеризується тяговою характеристикою. Збільшити зону силової дії магнітного поля на феромагнітні предмети можна шляхом збільшення міжполюсної відстані, яка визначається довжиною магніту. За обмежених габаритів системи це призводить до зменшення площі робочої поверхні полюсів і, як наслідок, падіння загальної підіймальної сили.

Таким чином, виникає технічна суперечність – спроба покращити вантажопідіймальну силу незмінно призводить до погіршення зусилля притягання в робочому зазорі. Основне призначення ловильних пристроїв – захоплення і транспортування аварійних предметів на поверхню. Надійне захоплення предметів можна забезпечити якісним промиванням і руйнуванням шару шламу фрезерними коронками або направляючими воронками. Під час піднімання бурильної колони на поверхню зі швидкістю до 2 м/с [29] на ловильний пристрій діють вібрації і удари, що є причиною

відриву уловлених предметів від магнітної системи. Тому нами надана перевага ловильним пристроям утримувальної дії, основним силовим показником яких є вантажопідіймальна сила.

Під час ловильних робіт у свердловинах на магнітні пристрої здійснюють вплив експлуатаційні чинники. Тому магнітні системи пристроїв повинні бути стійкі до дії агресивних промивальних рідин, високих температур, ударів, вібрацій, зовнішніх розмагнічуючих магнітних полів. Ловильні пристрої мають володіти достатньою механічною міцністю і стійкістю до дії статичних та динамічних навантажень.

Ловильні пристрої потрібно опускати на вибій на колоні бурильних труб. Під час аварійно-відновлювальних робіт у свердловинах відсутня необхідність проведення процесів промивання та фрезерування, тож з метою економії часу можливе опускання пристроїв на геофізичному кабелі або канаті. При цьому змінюється конструкція пристрою: не потрібно використовувати фрезерну коронку та виконувати в системі промивальний отвір.

З метою освоєння серійного виробництва ловильні пристрої повинні бути технологічними у виготовленні, нескладної конструкції, недорогі, прості в експлуатації та обслуговуванні.

Якість і технічний рівень магнітних ловильних пристроїв оцінюють за комплексом характеристик. Магнітні системи є основним вузлом ловильних пристроїв і відносяться до класу силових, тому вибір критеріїв ефективності безпосередньо визначається призначенням ловильного пристрою.

Основним показником призначення магнітних пристроїв є вантажопідіймальна сила F , яка характеризує магнітну енергією в робочому зазорі. За відомою формулою Максвелла

$$F = \frac{B^2 S_n}{2\mu_0}, \quad (2.1)$$

де B – магнітна індукція в робочому зазорі, Тл;

S_n – робоча площа полюсів магнітної системи, м²;

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

Важлива задача під час проектування магнітних систем – це одержання максимальної вантажопідіймальної сили. Згідно з формулою (2.1), її можна досягнути шляхом насичення магнітопроводів до максимального можливих значень магнітної індукції та збільшення площі полюсів, через які магнітний потік підходить до уловлюваного предмету. Одержати близьку до насичення індукцію можна шляхом використання висококоерцитивних постійних магнітів та оптимальної конструкції магнітної системи з мінімальними витратами магнітної енергії. Площа полюсів повинна займати якомога більшу частину опорної поверхні уловлювача, тому конструктивна досконалість магнітної системи визначається коефіцієнтом використання площі полюсів k_n [3, 61, 63, 64]:

$$k_n = \frac{S_n}{S_s}, \quad (2.2)$$

де S_n – площа робочої поверхні полюсів (магнітопроводів) мм²;

S_s – загальна площа робочої поверхні магнітної системи, мм².

Для силових магнітних систем загального призначення $k_n = 0,3-0,8$ [61].

Зважаючи на те, що частину робочої площі займають постійні магніти і промивальні отвори, для систем ловильних пристроїв k_n наближається до 0,8. Подальше збільшення площі полюсів недоцільне, адже це призводить до зменшення міжполюсної відстані, що негативно впливає на зусилля притягання.

Враховуючи, що на вибої свердловини залишаються предмети різної форми і площа контакту з полюсами набагато менша площі системи, більш актуальним для ловильних пристроїв є питома на одиницю площі вантажопідіймальна сила F_n :

$$F_n = \frac{F}{S_n}. \quad (2.3)$$

Досягти максимальних значень F_n можна за рахунок виконання полюсів з магнітом'якого заліза з індукцією насичення 2,1-2,2 Тл та зменшуючи S_n .

Для уловлювальних систем поряд із вантажопідіймальною силою F важливим силовим показником є зусилля притягання F_{np} , що характеризує міру силової дії на предмет на відстані δ від системи. Оцінити F_{np} можна за тяговими характеристиками $F_{np} = f(\delta)$.

Аналіз магнітних сил F , F_n , F_{np} показав їх складну залежність від конструктивних особливостей систем, матеріалів постійних магнітів і магнітопроводів, магнітних властивостей уловлюваних предметів та умов експлуатації. Тому для оцінки якості ловильних пристроїв різних типів і конструкції необхідно встановити підходи до визначення силових показників.

Проте, в даний час відсутні єдині умови і методи визначення силових показників. Так, вантажопідіймальну силу F пристрою одержують на розривній машині [3, 65, 66] шляхом відриву від випробувальної плити за умови повного перекриття робочої поверхні системи або підвішування до системи тарувальних вантажів [5, 47]. Відмінність у методах і підходах визначення показників для утримувальних та уловлювальних магнітних систем, а також їх пріоритетність вимагає врахування всього комплексу силових показників. Це дасть можливість надати їм визначеності і оперувати ними під час порівняння магнітних ловильних пристроїв.

Для оцінки експлуатаційних можливостей систем пропонується силовий критерій k_c . За допомогою співвідношень досягнутих і граничних значень загальної та питомої вантажопідіймальної сили k_c дасть змогу об'єктивно оцінювати досконалість магнітних пристроїв:

$$k_c = k_s \cdot k_n, \quad (2.4)$$

де k_s – коефіцієнт загальної вантажопідіймальної сили;

k_n – коефіцієнт питомої вантажопідіймальної сили.

$$k_3 = \frac{F}{F_m}, \quad (2.5)$$

де F_m – теоретично досяжна вантажопідіймальна сила, Н.

$$k_n = \frac{F_n}{F_{nm}}, \quad (2.6)$$

де $F_{nm} = 1,79-1,98 \text{ Н/мм}^2$ – теоретично досяжна питома вантажопідіймальна сила [61].

Теоретичні значення загальної F_m та питомої F_{nm} вантажопідіймальної сили визначаються за формулою Максвелла (2.1), яка, після підставлення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ та виражаючи S_3 в мм^2 набуде вигляду:

$$F_m = 0,406 B_m^2 S_3, \quad (2.7)$$

$$F_{nm} = 0,406 B_m^2, \quad (2.8)$$

де $B_m = 2,14 \text{ Тл}$ – максимальна магнітна індукція для магнітом'якого заліза [61].

Якість магнітної системи також визначається коефіцієнтом розсіювання магнітного потоку k_p , що характеризує величину втрат магнітного потоку:

$$k_p = \frac{\Phi_0}{\Phi_p}, \quad (2.9)$$

де Φ_0 – повний магнітний потік, що створює постійний магніт, Вб;

Φ_p – робочий магнітний потік на поверхнях магнітопроводів, Вб.

Для оцінки магнітних систем ловильних пристроїв застосовуються також критерії максимуму коефіцієнта використання матеріалу магнітів,

максимуму умовної корисної роботи, питомого тягового зусилля [3, 61, 66]. Вказані критерії визначаються конструкцією магнітної системи та матеріалом постійних магнітів і направлені на створення максимальних силових показників.

Таким чином, враховуючи умови експлуатації, встановлені вимоги до ловильних пристроїв, виконання яких дасть можливість розробити нові конструкції магнітних пристроїв, що забезпечить якісне очищення свердловин від феромагнітних уламків. На основі проведеного аналізу показників оцінки силових магнітних систем як основні критерії ефективності приймаємо загальну і питому вантажопідіймальну силу і силовий критерій.

2.2 Обґрунтування вибору матеріалів елементів магнітних систем

Важливу роль на етапі конструювання магнітної системи відіграє вибір матеріалів для постійних магнітів і магнітопроводів. Постійні магніти – це попередньо намагнічені тіла з магнітного матеріалу, які володіють значною залишковою індукцією та є джерелами постійних магнітних полів. Магнітопроводи потрібні для концентрації магнітного потоку, який створюється постійними магнітами, та направлення його на робочу поверхню ловильного пристрою.

За останній час відбулися значні зміни в технології виготовлення магнітотвердих матеріалів, що значно здешевили постійні магніти і дали можливість знайти їх широке використання, в тому числі і в системах ловильних пристроїв. З'являються нові марки постійних магнітів зі значно кращими характеристиками, проводяться дослідження з розроблення нанокompозитних магнітних матеріалів [67, 68]. Тому, необхідно розглянути властивості сучасних матеріалів і встановити доцільність використання в магнітних системах ловильних пристроїв.

Критерії вибору матеріалу постійних магнітів можна сформулювати так:

- можливість створення максимального магнітного поля за мінімальних розмірів системи;

- стійкість до дії підвищеної і пониженої температур, зовнішніх магнітних полів та інших розмагнічувальних чинників;

- простота у виготовленні та невисока вартість.

Найбільш важливими характеристиками магнітотвердих матеріалів є коерцитивна сила H_c , залишкова магнітна індукція B_r , робоча температура T_p , а також максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$, який визначає магнітну енергію W_{max} . Чим вища магнітна енергія, тим менше потрібно об'єму магнітотвердого матеріалу для створення магнітного поля максимального значення в робочому зазорі.

Згідно з класифікацією С. В. Вонсовського, в основі якої закладено відмінності в хімічному складі, природі висококоерцитивного стану та технології виготовлення, магнітотверді матеріали поділяються на 4 групи [7]:

- 1) магнітотверді матеріали системи ЮНДК (альніко);
- 2) магнітотверді ферити;
- 3) рідкісноземельні магнітотверді матеріали;
- 4) композиційні магнітотверді матеріали.

Перші магнітні ловильні пристрої для очищення свердловин від металу були створені на основі литих магнітів зі сплаву ЮНДК. Магніти альніко володіють наступними характеристиками: залишкова магнітна індукція B_r від 0,5 Тл до 1,4 Тл, коерцитивна сила H_c від 40 кА/м до 140 кА/м, енергетичний добуток $(BH)_{max}$ у кращих марок може досягати значення від 60 кДж/м³ до 70 кДж/м³ [69-71]. Вони найбільш термостабільні серед усіх видів магнітів і можуть використовуватися без значної втрати властивостей за температури до 600 °С. Проте, низька коерцитивна сила литих магнітів призводить до втрати їх магнітних і силових характеристик під час експлуатації та зберігання. Тому, системи з магнітами цього класу необхідно намагнічувати в зібраному стані, а також періодично відновлювати їх властивості в процесі експлуатації.

Внаслідок значних потоків розсіювання магнітних полів, єдиною можливою конструкцією магнітної системи з використанням магнітів зі сплавів альніко може бути високий феромагнітний стакан з циліндричними магнітами всередині. За оптимальних розмірів такої системи індукція на полюсах теоретично не може перевищувати 1,2 Тл, що забезпечує питому вантажопідіймальну силу в межах 0,6-0,65 Н/мм² за максимально можливого значення 2,34 Н/мм² [61]. Це означає, що використовувати литі магніти в системах уловлювача неефективно.

Певний час найпоширенішими магнітними матеріалами були магнітотверді ферити [61, 69, 72]. Практичне застосування знайшли ферити барію і стронцію з гексагональною кристалічною структурою та ферити кобальту з кубічною структурою. Внаслідок феримагнетизму ці з'єднання володіють низькою індукцією насичення, проте кристалографічна анізотропія дає змогу одержати високу коерцитивну силу. Тому, феритові магніти стійкі до розмагнічування, що дає можливість намагнічувати їх окремо до збирання без погіршення параметрів системи і, на відміну від магнітів альніко, розробляти будь-які конфігурації магнітних систем.

Марки та властивості феритів барію і стронцію регламентовані і контролюються згідно з ГОСТ 24063-80 “Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры” та ОСТ 11707.023-81 “Ферриты магнитотвердые прецизионные. Марки и основные параметры”.

Для магнітних систем ловильних пристроїв найоптимальнішими є анізотропні ферито-барієві магніти наступних марок: 22БА220, 24БА210, 28БА190 [3]. Залишкова індукція магнітів B_r знаходиться в межах від 0,36 Тл до 0,39 Тл, коерцитивна сила H_c – від 185 кА/м до 215 кА/м, енергетичний добуток $(BH)_{max}$ може досягати значення 28 кДж/м³ [73, 74].

Недоліком феритових магнітів є суттєва залежність коерцитивної сили від температури, що обмежує використання цих магнітів за значних від'ємних температур. Ферити крихкі, володіють великою твердістю і недостатньою міцністю. Окрім того, внаслідок пористої структури феритових

магнітів, їх потрібно оберегати від потрапляння в пори вологи та її замерзання.

Низькі значення залишкової індукції феритів зумовлюють особливості конструкції силових магнітних систем з концентраторами магнітного потоку. Це дає можливість створювати в робочому зазорі магнітну індукцію значно більшу, ніж у системах з литими магнітами [61]. Тому, вантажопідіймальна сила пристроїв з постійними феритовими магнітами також буде більшою.

До магнітних матеріалів з високою коерцитивною силою відносяться сплави Ag-Mn-Al та Pt-Co, що містять дорогоцінні метали (через високу вартість вони не знайшли застосування), та матеріали з високою константою магнітокристалічної анізотропії – так звані рідкісноземельні магнітотверді матеріали [7, 69].

Рідкісноземельні магніти – це магніти, що виготовляються з додаванням елементів лантаноїдної групи. Найчастіше використовуються у виготовленні постійних магнітів самарій (Sm) і неодим (Nd). Існує велика кількість сумішей та сплавів з використанням цих елементів, проте широкого розповсюдження набули сплави самарій-кобальт (Sm-Co) та неодим-залізо-бор (Nd-Fe-B).

Самарій-кобальтові магніти виготовляють зі сплавів сполучення SmCo_5 та $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. За поєднанням магнітних властивостей вони значно перевищують феритові матеріали. Так, самарієві магніти мають залишкову магнітну індукцію B_r до 1,15 Тл, коерцитивну силу за індукцією H_{CB} в межах від 460 кА/м до 800 кА/м, енергетичний добуток $(BH)_{max}$ матеріалів сполучення SmCo_5 досягає 190 кДж/м³, а сполучення $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ – 260 кДж/м³ [7]. Перевагами самарієвих магнітів також є відмінна корозійна стійкість, стабільність магнітних параметрів за температур до 350 °С. Перешкодою до широкого використання сплавів самарій-кобальт у магнітних системах уловлювачів є їх висока вартість, яка, в міру вдосконалення технології виготовлення постійних магнітів, постійно зменшується.

На сьогоднішній день, найвищими магнітними параметрами володіють спечені рідкісноземельні магніти складу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Залишкова магнітна індукція цих матеріалів може досягати значення $B_r = 1,47$ Тл, а енергетичний добуток $(BH)_{max} = 420$ кДж/м³ [7, 75-78]. Неодимові магніти дешевші, ніж самарієві, завдяки відсутності в їх складі достатньо дорогого металу – кобальту. До недоліків потрібно віднести невисоку робочу температуру магнітів деяких марок, а також низьку корозійну стійкість, яка усувається покриттям поверхні магнітів захисними шарами міді, цинку, нікелю, хрому.

Четверта група матеріалів – композиційні магнітотверді матеріали. Їх виготовляють на основі порошків магнітотвердих матеріалів однієї із груп (альніко, ферити, рідкісноземельні матеріали, а також їх комбінації) і полімерного наповнювача – пластмас (магнітопласти) або каучука (магнітоеластичні). Переваги цих матеріалів – технологічність виготовлення, пластичність, низька трудомісткість виготовлення магнітів складних форм. Проте вони мають і низку недоліків. Робочі температури магнітопластів низькі порівняно з робочими температурами спечених магнітів. Верхня температурна межа використання встановлюється температурним станом наповнювача (зазвичай ця величина становить від 80 °С до 220 °С). Окрім того, магнітні параметри значно нижчі, ніж у спечених магнітних матеріалів. Так, наприклад, максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$ для композиційних рідкісноземельних магнітів становить лише 90 кДж/м³ [7, 76].

Проведений порівняльний аналіз основних характеристик магнітотвердих матеріалів [7, 76, 79] (рис. 2.1) та кривих розмагнічування (рис. 2.2) дав можливість встановити:

- магнітотверді матеріали на основі рідкісноземельних металів володіють більш високими магнітними параметрами порівняно з магнітами альніко за рахунок високої коерцитивної сили, а порівняно з феритами – за рахунок високої залишкової індукції;

- енергетичний добуток $(BH)_{max}$ магнітів Nd-Fe-B в 10-15 разів, самарій-кобальтових – в 6-10 разів вищий, ніж у феритових;

- найвищою робочою температурою володіють магніти альніко;
- серед рідкісноземельних магнітів неодимові володіють на 20-25 % вищими магнітними характеристиками, ніж самарій-кобальтові.

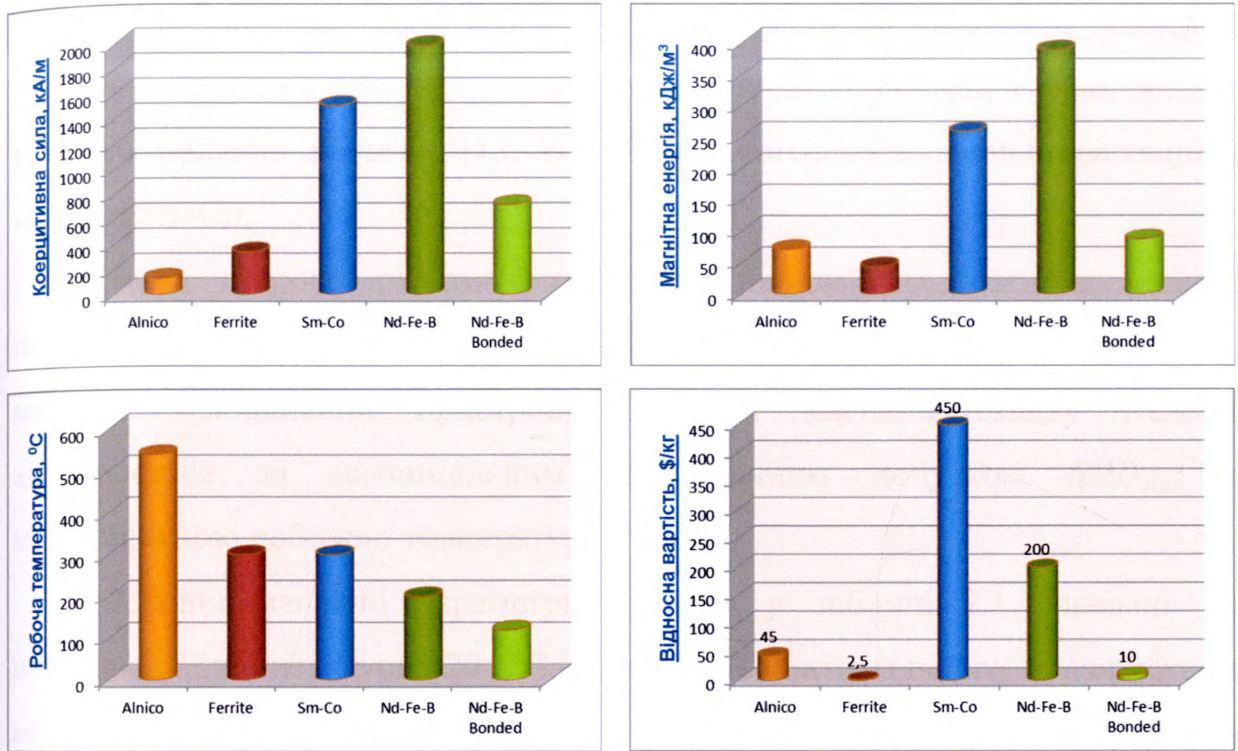


Рисунок 2.1 – Порівняльні діаграми основних характеристик магнітотвердих матеріалів

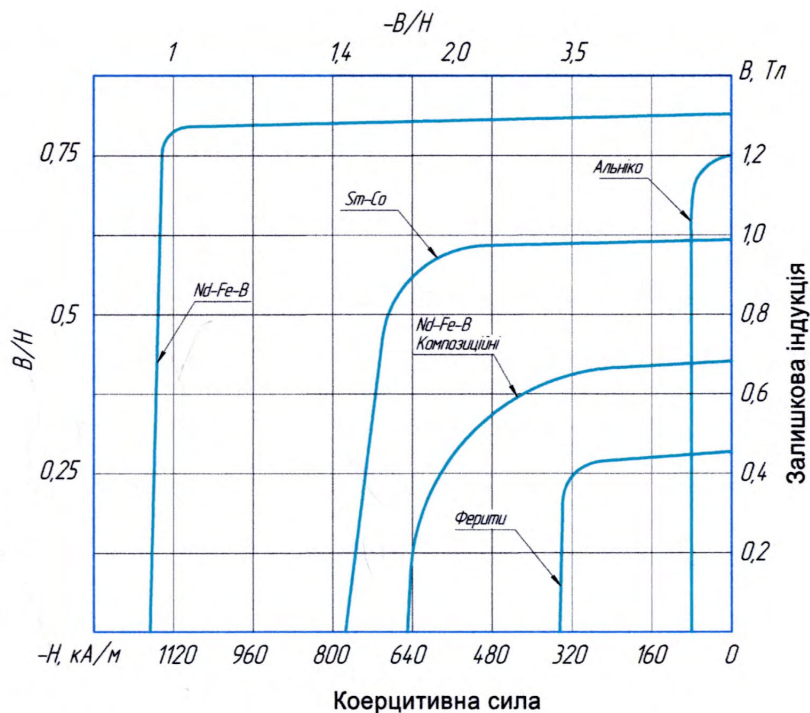


Рисунок 2.2 – Криві розмагнічування магнітотвердих матеріалів

Незважаючи на широкий вибір наявних сьогодні магнітотвердих матеріалів, жоден із них не задовольняє всі вимоги. Найпридатнішими є магніти, які виготовляють з рідкісноземельних металів хімічного складу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Завдяки високим магнітним властивостям (табл. 2.1), використання матеріалів Nd-Fe-B дає змогу суттєво зменшити габарити існуючих магнітних систем і створити компактніші ловильні пристрої з раціональною площею полюсів магнітів [13, 80]. Окрім того, вони значно дешевші за магніти Sm-Co.

Через широке різноманіття марок неодимових магнітів виникає питання вибору оптимальної з них для конкретних умов експлуатації магнітних ловильних пристроїв. Градація магнітів складу Nd-Fe-B здійснюється за максимальним енергетичним добутком $(BH)_{max}$ та максимальною робочою температурою T_p .

Основні магнітні параметри магнітів у таблиці 2.1 наведені для нормальної температури 20 °С. Тому для оптимального використання магнітотвердих матеріалів потрібно звертати увагу на температурні коефіцієнти, які визначають зміну кривої розмагнічування під час теплового впливу на матеріал і температуру Кюрі T_c . Температурний коефіцієнт магнітної індукції α для неодимових магнітів знаходиться в межах від -0,07 %/°С до -0,13 %/°С (під час нагрівання на 100 °С залишкова магнітна індукція знижується від 7 до 13 %), а температурний коефіцієнт коерцитивної сили β становить $-(0,55 - 0,65)$ %/°С [7]. Магніти Nd-Fe-B мають низьку температуру точки Кюрі T_c (критична температура, за якої феромагнетик стає парамагнетиком) – приблизно 310 °С, проте її можна підвищити.

Відомо, що температура на вибої свердловини відрізняється від температури на поверхні. Наявність магнітопроводів дещо підвищує термостабільність магнітної системи, проте неодимові постійні магніти з робочою температурою 80 °С можна використовувати в ловильних пристроях лише для неглибоких свердловин. Для глибоких свердловин необхідно використовувати постійні магніти з максимальною робочою

Таблиця 2.1 – Магнітні параметри матеріалів Nd-Fe-B [7, 75, 76]

Марка	Залишкова магнітна індукція B_r , Тл	Коерцитивна сила за індукцією H_{cB} , кА/м	Коерцитивна сила за нама- гніченістю H_{cJ} , кА/м	Максимальний добуток $(BH)_{max}$, кДж/м ³	Максимальна робоча температура T_p , °C
N35	1,17-1,21	860-915	≥955	263-279	≤80
N38	1,22-1,26	860-915	≥955	287-303	≤80
N40	1,26-1,29	860-955	≥955	303-318	≤80
N42	1,29-1,32	860-955	≥955	318-334	≤80
N45	1,32-1,37	860-995	≥955	342-358	≤80
N48	1,37-1,42	860-995	≥955	358-382	≤80
N50	1,40-1,46	860-995	≥955	374-406	≤80
N52	1,42-1,47	860-995	≥955	380-422	≤80
N35M	1,17-1,21	860-915	≥1114	263-279	≤100
N38M	1,22-1,26	860-915	≥1114	287-303	≤100
N40M	1,26-1,29	860-955	≥1114	303-318	≤100
N42M	1,29-1,32	860-995	≥1114	318-334	≤100
N45M	1,32-1,37	860-1035	≥1114	342-358	≤100
N48M	1,37-1,42	860-995	≥1114	358-382	≤100
N50M	1,40-1,46	860-995	≥1114	374-406	≤100
N30H	1,08-1,12	804-844	≥1353	223-239	≤120
N33H	1,14-1,17	820-876	≥1353	247-263	≤120
N35H	1,17-1,21	860-915	≥1353	263-279	≤120
N38H	1,22-1,26	860-915	≥1353	287-303	≤120
N40H	1,26-1,29	860-955	≥1353	303-318	≤120
N42H	1,29-1,32	860-955	≥1353	318-334	≤120
N44H	1,32-1,36	860-1035	≥1353	334-350	≤120
N48H	1,37-1,42	860-995	≥1353	358-382	≤120
N30SH	1,08-1,12	804-844	≥1592	223-239	≤150
N33SH	1,14-1,17	820-876	≥1592	247-263	≤150
N35SH	1,17-1,21	860-915	≥1592	263-279	≤150
N38SH	1,22-1,26	860-915	≥1592	287-303	≤150
N40SH	1,26-1,29	860-955	≥1592	303-318	≤150
N42SH	1,29-1,32	860-955	≥1592	318-334	≤150
N45SH	1,32-1,37	860-955	≥1592	342-358	≤150
N25UH	0,98-1,02	732-764	≥1990	183-199	≤180
N28UH	1,04-1,08	780-812	≥1990	207-233	≤180
N30UH	1,08-1,12	804-844	≥1990	223-239	≤180
N33UH	1,14-1,17	820-876	≥1990	247-263	≤180
N35UH	1,17-1,21	860-915	≥1990	263-279	≤180
N38UH	1,22-1,26	860-915	≥1990	287-303	≤180
N40UH	1,26-1,29	860-955	≥1990	303-318	≤180
N25EH	0,98-1,02	732-764	≥2388	183-199	≤200
N28EH	1,04-1,08	780-812	≥2388	207-223	≤200
N30EH	1,08-1,12	804-844	≥2388	223-239	≤200
N33EH	1,14-1,17	820-876	≥2388	247-263	≤200
N35EH	1,17-1,21	860-915	≥2388	263-279	≤200

температурою від 150 °С до 200 °С [13]. Досягти підвищення робочої температури магнітів можна легуванням їх диспрозієм, кобальтом, ніобієм, ванадієм і т.д. Покриття даними елементами покращує температурну і корозійну стабільність магнітів, проте різко збільшує їх вартість. Окрім того, високотемпературні неодимові магніти володіють дещо нижчими магнітними властивостями. Тому у системах магнітних ловильних пристроїв, що експлуатуються у свердловинах за температур вище 180 °С доцільно поряд із неодимовими використовувати магніти сплаву самарій-кобальт.

Магнітом'які матеріали для постійних магнітних полів повинні володіти високою магнітною проникністю і низькою коерцитивною силою, а також великою індукцією насичення, тобто пропускати максимальний магнітний потік через певну площу перерізу магнітопроводу. До них відносяться: технічно чисте залізо, електротехнічні сталі та сплави заліза з нікелем або заліза з кобальтом (пермалої та пермендюри) [61, 69, 73].

Зважаючи на те, що загальна маса магнітопроводів в одному пристрої може досягати десятки кілограм, то матеріал повинен бути дешевим та недефіцитним. Окрім того, магнітопроводи можуть сприймати значні навантаження, що ставить вимогу до їх міцнісних характеристик. Найбільш відповідними матеріалами для магнітопроводів є вуглецеві сталі звичайної якості та конструкційні – марок сталь Ст. 3, сталь 10, сталь 20. Вони мають хороші механічні і технологічні властивості, високу індукцію насичення до 2,13 Тл та магнітну проникність 2000-4000 [3, 61, 69].

Найвищими магнітними властивостями на сьогодні володіють пермендюри – сплави заліза з кобальтом, леговані молібденом, ванадієм, хромом та іншими елементами. Основна перевага пермендюрів – надзвичайно висока магнітна проникність у слабких магнітних полях, а також низька коерцитивна сила. Індукція насичення цих матеріалів досягає значення 2,45 Тл [69]. Використання в магнітних системах ловильних пристроїв таких сплавів може значно підвищити вантажопідіймальну силу, проте висока вартість матеріалу робить цей процес не вигідним.

Для монтажу магнітних систем і надання їм необхідної жорсткості потрібно використовувати деталі, виготовлені із латуні, бронзи та немагнітні сталі. Простір між магнітами та магнітопроводами заповнюється клеями на епоксидній основі.

Таким чином, обґрунтовано вибір матеріалів постійних магнітів, магнітопроводів та немагнітних матеріалів, що забезпечить високі силові і магнітні характеристики систем ловильних пристроїв.

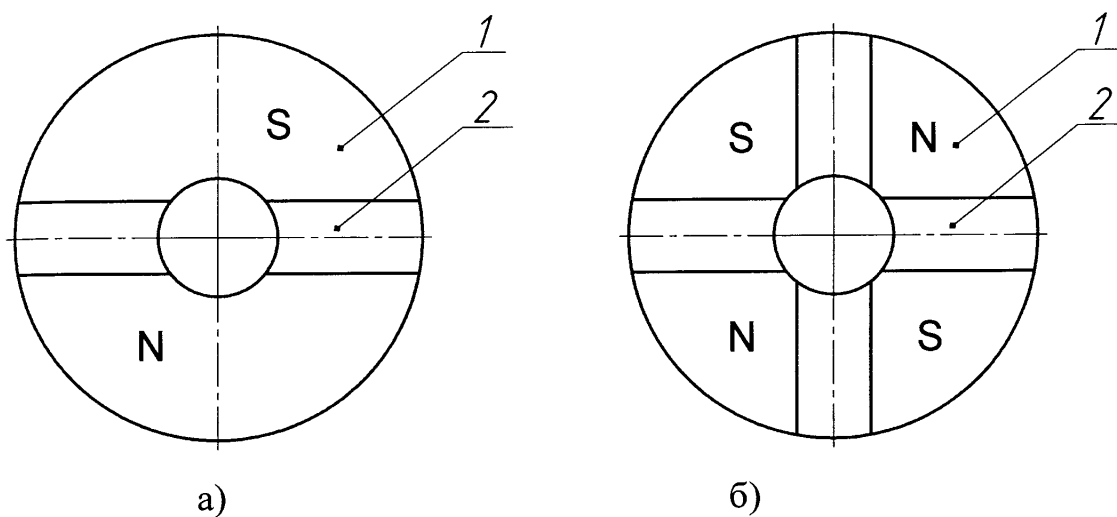
2.3 Аналіз і синтез магнітних систем

На ефективність пристроїв на основі постійних магнітів насамперед впливає конструкція магнітної системи та використані в ній матеріали. Силові системи магнітних ловильних пристроїв відносяться до класу вантажопідіймальних, тобто призначені для притягання, утримання та піднімання на поверхню металевих предметів.

На сьогодні окремі світові виробники використовують у своїх пристроях литі магніти [6, 30, 50]. При цьому магнітна система складається з одного або декількох циліндричних магнітів, розміщених між двома полюсами. Суттєвими недоліками даних систем є здатність до саморозмагнічування та значні потоки розсіювання магнітного поля, що є причиною невисокої вантажопідіймальної сили. Тому використовувати системи з литими магнітами в ловильних пристроях недоцільно.

У системах, зображених на рис. 2.3 [3], постійні магніти розташовані між магнітопроводами. Для забезпечення необхідної довжини магнітного блока у випадку використання феритових магнітів, їх з'єднують паралельно. При цьому магнітні потоки підсумовуються на полюсах і утворюють загальний робочий потік магнітної системи. Якщо існує необхідність зменшити довжину ловильного пристрою, можна застосувати в системі рідкісноземельні магнітотверді матеріали або скористатися конструкцією з більшою кількістю магнітів та магнітопроводів (рис. 2.3, б). У цьому випадку

за рахунок невеликого зменшення площі робочої поверхні магнітопроводів (на 15 %) довжина системи зменшується в 2 рази. Значення вантажопідіймальної сили для такої конструкції системи дещо менше, відрізняється на величину різниці площі магнітопроводів.



а – П-подібна система; б – система з розгалуженими магнітними ланцюгами

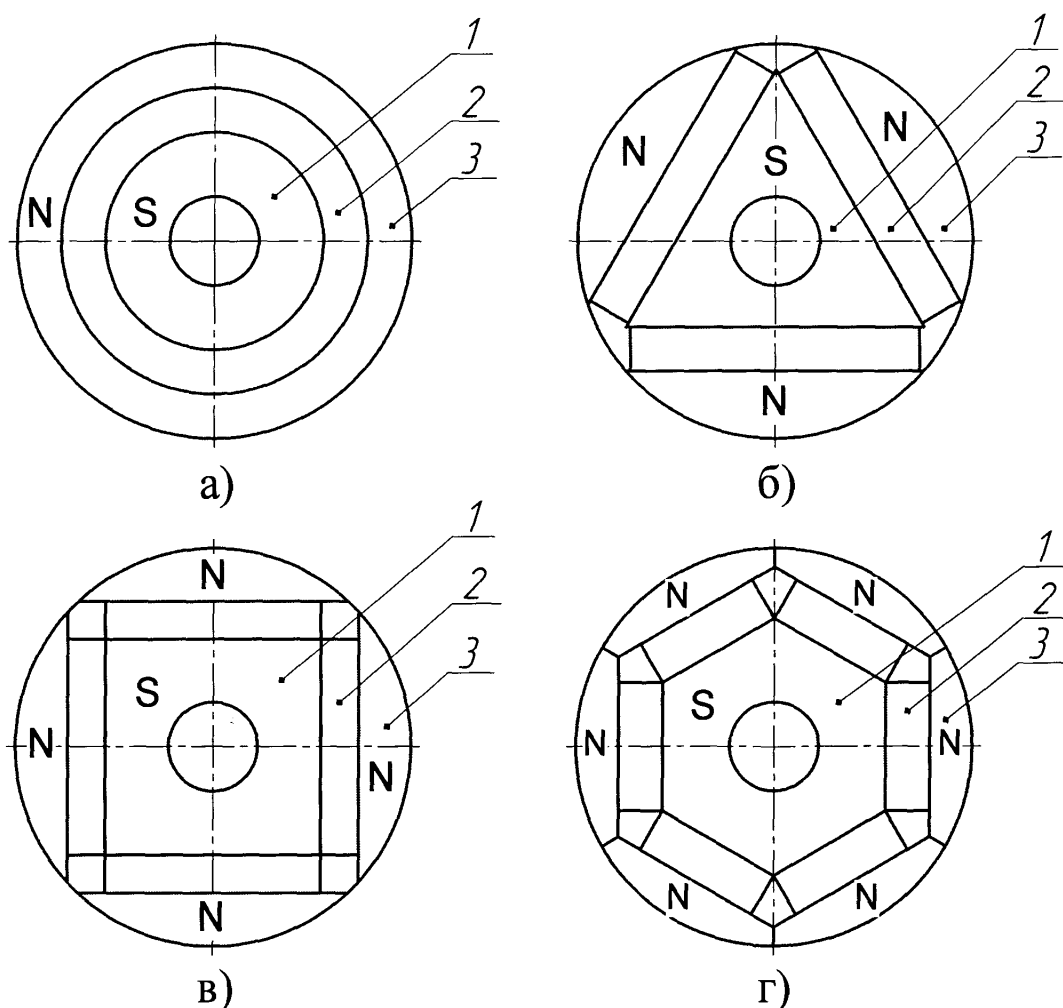
1 – магнітопровід; 2 – постійний магніт

Рисунок 2.3 – Схеми магнітних систем

Незважаючи на просту конструкцію, дані системи володіють істотним недоліком – велике розсіювання магнітного потоку на зовнішніх поверхнях різноіменних магнітопроводів, що зумовлює необхідність розташування системи в корпусі-екрані із зазором. Щоправда, наявність сталевго корпусу ще більше знижує ефективність магнітних систем. Тому, незважаючи на можливість насичення полюсів, максимальна сила розглянутих систем не буде достатньо високою.

Проведеними раніше дослідженнями встановлено, що найприйнятнішими для використання в ловильних пристроях є броньові системи з паралельним з'єднанням постійних магнітів [3, 66]. Перспективною є магнітна система з кільцевими постійними магнітами (рис. 2.4, а) [81], яка характеризується рівномірним розподілом магнітного поля на робочій поверхні та практично відсутністю потоків розсіювання. Але перешкодою

для створення таких систем є складність технології виготовлення кільцевих радіально намагнічених постійних магнітів. Внаслідок цього їх вартість на порядок вища за аналогічні пластинчасті магніти, що унеможливує їх використання у системах ловильних пристроїв.



а – система з кільцевими радіально-намагніченими магнітами;

б, в, г – системи з пластинчастими магнітами з трикутним, чотирикутним і шестикутним центральним магнітопроводом відповідно;

1 – центральний магнітопровід; 2 – постійний магніт;

3 – периферійний магнітопровід;

Рисунок 2.4 – Схеми броньових магнітних систем

Броньову магнітну систему можна виконати і на пластинчастих магнітах. Така система (рис. 2.4, б) [82] виконана у вигляді трьох сегментних магнітопроводів однойменної полярності і центрального магнітопроводу

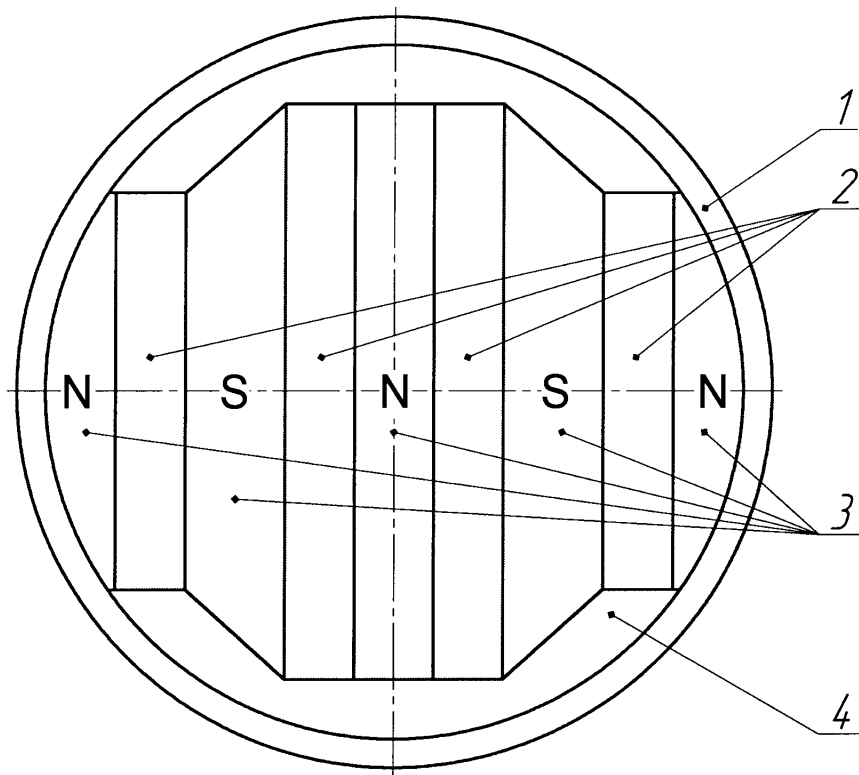
протилежної полярності, що має форму трикутної призми. Постійні магніти розміщені між сегментними і центральним магнітопроводами і з'єднані в магнітному ланцюзі паралельно. Розсіювання магнітного потоку мінімальне, відбувається на кутах центрального магнітопроводу та відкритих торцевих поверхнях магнітів. Через порушення умови рівності площі центрального і сегментного магнітопроводів в уловлювачах великих діаметрів, магнітні системи з трикутним розташуванням постійних магнітів доцільно використовувати в системах діаметром до 100 мм [3].

За розмірів системи від 100 мм до 150 мм потрібно використовувати систему (рис. 2.4, в) [83], в якій центральний магнітопровід виконаний у формі чотирикутної призми та має полярність, протилежну чотирьом периферійним сегментним магнітопроводам. Така система більш технологічна у виготовленні та володіє кращими характеристиками [3].

Для уловлювачів великих діаметрів розроблено конструкції броньових систем з центральними магнітопроводами у вигляді п'ятикутної та шестикутної призми (рис. 2.4, г). Складність насичення центрального магнітопроводу є основним недоліком даних систем. Тому збільшення числа граней центрального магнітопроводу не дає змоги одержати оптимальну конструкцію системи великого діаметра.

Реальнішим шляхом підвищення ефективності магнітних систем великого діаметру (більше 150 мм) є збільшення кількості магнітопроводів, тобто створення багатополюсних систем. Така конструкція дасть можливість створити максимальну індукцію на робочій поверхні магнітопроводів.

У системі уловлювача (рис. 2.5) [57] постійні магніти розміщені назустріч один одному за полярністю та закріплені на бокових поверхнях полюсів. Недоліком даного уловлювача є велике розсіювання магнітного потоку між корпусом і боковими торцевими поверхнями магнітопроводів протилежної полярності. Площа робочої поверхні системи використовується неефективно, адже значну її частину займає немагнітний наповнювач.



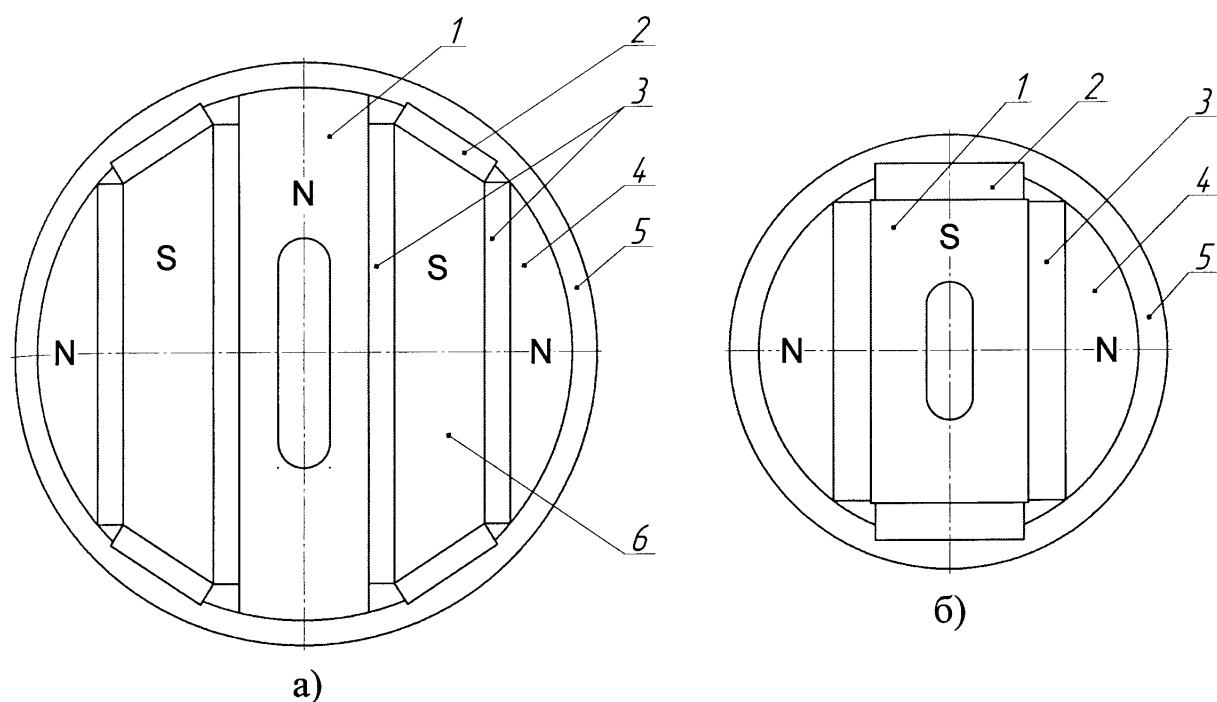
1 – корпус; 2 – постійні магніти; 3 – полюси; 4 – немагнітні ділянки

Рисунок 2.5 – Магнітна система ловильного пристрою

Один з методів обмеження втрат енергії в магнітних системах полягає в розміщенні на шляхах протікання магнітних потоків розсіювання невеликих магнітів, які генерують зустрічний магнітний потік і блокують таким чином втрати магнітної енергії [72]. Цей метод поки що не використовувався, але завдяки високій ефективності є дуже перспективним.

Нами розроблено багатополіусну систему (рис. 2.6, а) [9], що містить центральний, проміжні та сегментні магнітопроводи різнойменної полярності, між якими розміщені рідкісноземельні постійні магніти. У центральному магнітопроводі виконано отвір для підведення промивальної рідини під час ловильних робіт. Для запобігання розсіювання магнітного поля, ефективного використання магнітної енергії між боковими поверхнями проміжних магнітопроводів і обіймою розміщені допоміжні постійні магніти. Вони виконують роль екрана магнітного поля і дають можливість досягнути більш рівномірного розподілу магнітної індукції в магнітопроводах. Обойма містить пази для фіксації допоміжних магнітів,

виготовляється із низьковуглецевої сталі та здійснює функцію додаткового магнітопроводу.



а – система діаметром понад 150 мм; б – система діаметром до 150 мм.

1 – центральний магнітопровід; 2 – допоміжний магніт; 3 – постійні магніти;
4 – сегментний магнітопровід; 5 – обойма; 6 – проміжний магнітопровід

Рисунок 2.6 – Магнітні системи з допоміжними магнітами

Для ловильних пристроїв невеликого діаметра розроблено подібну конструкцію магнітної системи з допоміжними магнітами (рис. 2.6, б). Система містить центральний магнітопровід у вигляді прямокутної призми, сегментні магнітопроводи, постійні магніти та обойму.

Аналіз конструкцій магнітних систем підтвердив ефективність систем броньового типу. Мінімальне розсіювання магнітного поля та можливість трансформації магнітної індукції – основні переваги даних систем, що забезпечують високі силові і магнітні параметри ловильних пристроїв. Високий розмагнічувальний чинник броньових систем потребує використання висококоерцитивних магнітів. Вибрані вище рідкісноземельні магнітотверді матеріали складу Nd-Fe-B повністю відповідають цій вимозі.

Таким чином, проведений аналіз дав можливість встановити раціональні конструктивні схеми магнітних систем, що стануть основою для створення високоефективних ловильних пристроїв. У пристроях діаметром до 195 мм доцільно використовувати броньові системи з трикутною або чотирикутною схемою розміщення постійних магнітів (рис. 2.4, б, в та рис. 2.6, б). Для свердловин з великим умовним діаметром розроблено багатополосну магнітну систему (рис. 2.6, а). З метою запобігання розсіювання магнітного поля периферійних магнітопроводів на корпус усі системи запропоновано розміщувати в феромагнітній обоймі.

Важливим питанням є встановлення раціональних геометричних співвідношень між елементами магнітних систем з метою максимального використання енергії постійних магнітів, для вирішення якого необхідні теоретичні та експериментальні дослідження.

Висновки до розділу 2

1. На основі аналізу умов експлуатації та чинників, що впливають на процес уловлення металевих предметів, встановлено вимоги до конструкцій магнітних ловильних пристроїв.

2. Визначено, що основними критеріями ефективності ловильних пристроїв є загальна і питома вантажопідіймальна сила. Запропоновано, як функціональний критерій магнітних ловильних пристроїв, силовий показник, який в повній мірі дасть можливість оцінити досконалість розроблених систем і визначити шляхи їх розвитку.

3. У результаті аналізу властивостей магнітотвердих матеріалів встановлено, що рідкісноземельні неодимові магніти володіють найвищими характеристиками та найбільш придатні для використання в магнітних системах ловильних пристроїв. Розроблено рекомендації щодо вибору матеріалу магнітів у системах ловильних пристроїв залежно від температури на вибої. Обґрунтовано вибір магнітом'яких матеріалів.

4. Удосконалено конструктивні схеми магнітних систем діаметром до 150 мм шляхом введення додаткового магнітопроводу – феромагнітної обойми для вирівнювання площ полюсів різнойменної полярності. Розроблено принципово нові конструкції броньових багатополюсних систем з допоміжними магнітами, що зводять до мінімуму розсіювання магнітного поля. Встановлено, що конструкції магнітних систем броньового типу на основі висококоерцитивних рідкісноземельних магнітів дають можливість одержати високі параметри ловильних пристроїв.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ СИСТЕМ

3.1 Методи розрахунку магнітних полів систем ловильних пристроїв

Розрахунок магнітних полів систем ловильних пристроїв є важливим завданням у процесі їх проектування. Незважаючи на широке застосування магнітних систем, у тому числі на основі постійних магнітів, методика розрахунку залишається складною навіть для простих конструкцій. Неточності у розрахунках можуть призвести до встановлення нераціональних розмірів елементів магнітних систем, і, як наслідок, до зайвої витрати матеріалів.

Методи розрахунку магнітних полів можна поділити на три основні групи: аналітичні, графічні та чисельні. До аналітичних відносяться метод розмагнічувального фактора, метод Роговського, метод послідовного сумування, метод конформних перетворень [84-87]. Окрім того, поширеним є метод еквівалентних електричних ланцюгів, в якому, для полегшення розрахунку, використовують формальну аналогію між постійним магнітом як джерелом магніторушійної сили та електричним ланцюгом з джерелом електрорушійної сили [84, 87].

В аналітичних методах розрахунку магнітних полів використовуються наближені математичні вирази, які можна одержати лише для простих магнітних систем. Ускладнення досліджуваної геометрії системи унеможлиблює розрахунки за даними методами, а спрощення моделей може вплинути на точність кінцевого результату [88].

Графічні та графоаналітичні методи розрахунку (метод Ротерса, метод Лемана-Ріхтера, метод Евершеда-Піку) дають можливість розраховувати параметри магнітного поля у складніших конструкціях, характеризуються наглядністю та вищою точністю, ніж аналітичні методи [61, 66, 86]. Проте вони громіздкі та незручні, адже для їх реалізації необхідно багато часу для

побудови кривих намагнічування (розмагнічування), що знижує можливість дослідження магнітних полів.

У теперішній час широкого розвитку набули чисельні методи, до яких відносять метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод інтегральних рівнянь. Перевагою чисельних методів є можливість розрахунку магнітних полів об'єктів будь-якої геометричної форми, враховуючи при цьому нелінійні властивості матеріалів.

Метод інтегральних рівнянь дає змогу розрахунок поля в неоднорідному середовищі звести до однорідного. У цьому методі виділяють два підходи до розрахунку: методом граничних інтегральних рівнянь і методом просторових інтегральних рівнянь [85, 89, 90]. У першому використовуються умови на межах неоднорідних магнітних середовищ. Метод граничних інтегральних рівнянь використовується для розрахунку магнітних систем з лінійними характеристиками матеріалів, оскільки ділянка інтегрування обмежується поверхнями. Натомість метод просторових інтегральних рівнянь придатний для розрахунку будь-яких конструкцій магнітних систем з урахуванням нелінійних властивостей. Недоліком є неможливість обмеження досліджуваної ділянки поверхнями з відомими граничними умовами [91, 92].

У методі скінченних різниць неперервний розподіл скалярного або векторного магнітного потенціалу замінюється на дискретний. Простір всередині магнітного поля розбивається сіткою на досить велику кількість вузлів, для яких складають системи кінцево-різницевих рівнянь. Недоліком такого методу є повільна збіжність ітераційного процесу під час розв'язання нелінійних задач [85, 86].

У розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) простір, який займає магнітне поле, розбивається на окремі частини з малими розмірами – скінченні елементи. Основна ідея МСЕ полягає в тому, щоб будь-яку неперервну величину (індукція або напруженість магнітного поля) апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на множині кусково-

неперервних функцій, визначених на скінченній кількості елементів [92-94]. Перевагами МСЕ є можливість розрахунку полів об'єктів зі складною геометрією, якими є системи ловильних пристроїв і нелінійними властивостями матеріалів. Окрім того, нескладно зменшити розміри скінченних елементів у ділянках з великими градієнтами поля, що збільшить точність результату. Зі швидким розвитком обчислювальної техніки потреба значного об'єму пам'яті для МСЕ легко вирішується.

На сьогодні значно підвищились вимоги до якості розрахунку магнітних полів, все частіше потрібно розв'язувати параметричні та оптимізаційні задачі. Одним із варіантів удосконалення методики розрахунку магнітних систем є використання методу скінченних елементів для моделювання магнітного поля.

Для розрахунку магнітних систем ловильних пристроїв раніше використовувалися аналітичні, графоаналітичні та чисельні методи [3, 65, 66, 95, 96]. Першим двом способам притаманні низька точність розрахунків та проблеми математичного характеру, так як спроектовані системи нелінійні, а їх параметри залежні від розмірів і властивостей матеріалів. Одержані рівняння досить складні, тому розрахунок доцільно здійснювати лише за наявності готової комп'ютерної програми. У роботі [65] розроблено двовимірну скінченно-елементну модель магнітного ловильного пристрою у варіаційній постановці. На її основі здійснюється розрахунок і проектування магнітних систем з використанням спеціально розробленої програми розрахунку на ПЕОМ. Основним недоліком двовимірного розрахунку є припущення, що геометрія моделі, властивості середовищ та параметри, що характеризують джерела поля, не змінюються в напрямку однієї з осей. Це суттєве обмеження під час розрахунку реальних систем, для деяких з них прийнятне тільки тривимірне моделювання.

На даний час відсутня необхідність розроблення нових програмних продуктів, адже існує значна кількість комплексів розрахунку магнітних полів, що використовують МСЕ. Найбільш відомими програмними засобами

є: ELCUT, JMAG, FEMM, CosmosEMS, COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell.

Програмне забезпечення ANSYS Maxwell порівняно з аналогами характеризується функціональністю і простотою в освоєнні. Поряд з іншими задачами, модуль Maxwell дає змогу розв'язувати магнітостатичні лінійні та нелінійні тривимірні поля, створені постійними магнітами. Особливістю програмного комплексу ANSYS Maxwell є можливість автоматичної адаптації сітки скінченних елементів у ділянках з різким просторовим градієнтом поля. Окрім того, для підвищення точності результату передбачено ручне введення операцій над сіткою. Додатковий модуль Optimetrics додає до проекту параметричний, оптимізаційний та статистичний аналіз. З його допомогою можна оптимізувати геометрію моделі, розрахувати необхідні характеристики для змінних вхідних даних, а також віднайти оптимальний варіант конструкції [97, 98].

ANSYS Maxwell розв'язує задачі електромагнітного поля використовуючи рівняння Максвелла в скінченній ділянці простору з відповідними граничними та заданими початковими умовами. Тобто, розв'язується система алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих коефіцієнтів. Для цього геометрія автоматично розбивається на чотиригранні елементи у тривимірній постановці задачі. Набір всіх тетраедрів (сітка скінченних елементів) об'єднується сітковим генератором в єдину структуру.

Після дискретизації простору генератором сітки скінченних елементів, створюється велика розріджена матриця рівнянь

$$[S] [H] = [J], \quad (3.1)$$

де $[J]$ – джерело магнітного поля;

$[H]$ – невідоме магнітне поле;

$[S]$ – значення коефіцієнтів.

Для розв'язку подібних рівнянь використовуються стандартні алгоритми розв'язку матриць: Sparse Gaussian Elimination (прямий розв'язок),

Incomplete Choleski Conjugate Gradient Method (ітеративний) [98]. У результаті відтворюється загальна картина поля за допомогою методів апроксимації та з використанням квадратичної поліноміальної базової функції другого порядку для кожного елемента:

$$(Hx(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6xz + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2). \quad (3.2)$$

У тривимірному моделюванні для одержання базової функції для кожного тетраедра визначаються величини поля для десяти точок – у кожній з чотирьох вершин та на всіх серединах вузлових ребер.

Рівносторонні тетраедри найкраще працюють з квадратичною інтерполяцією другого порядку, що використовується між вузлами. Тому, бажано здійснювати розрахунок на відносно однорідній сітковій моделі та збільшувати дискретизацію на ділянках з різким просторовим градієнтом поля. Проте не завжди вдається наперед визначити такі ділянки. Основною особливістю MCE, що реалізується в ANSYS Maxwell, є можливість визначення помилки в локальному масштабі. Алгоритм адаптивного покращення сіткової моделі збільшує густину сітки в ділянках з найбільшою помилкою. Відтак, розв'язання задачі відбувається на сітковій моделі з найменшою кількістю елементів, забезпечуючи при цьому максимальну точність результату.

Розберемо роботу алгоритму адаптивного покращення сіткової моделі на прикладі системи діаметром 225 мм. Початкова сітка налічувала 25418 елементів. Після кожного з десяти проходів кількість елементів збільшувалася приблизно на 30 %, і в результаті склала 269545 елементів. У першу чергу нас цікавить розрахунок поля на ділянках з високою напруженістю, а саме на робочій поверхні системи. Тому тут встановлюємо обмеження – максимальна довжина кожного елемента не більше 2 мм. Враховуючи сіткові операції, алгоритм автоматичної адаптації сітки побудував 711827 скінченних елементів (рис. 3.1). Цього більш ніж достатньо для одержання точного розподілу поля.

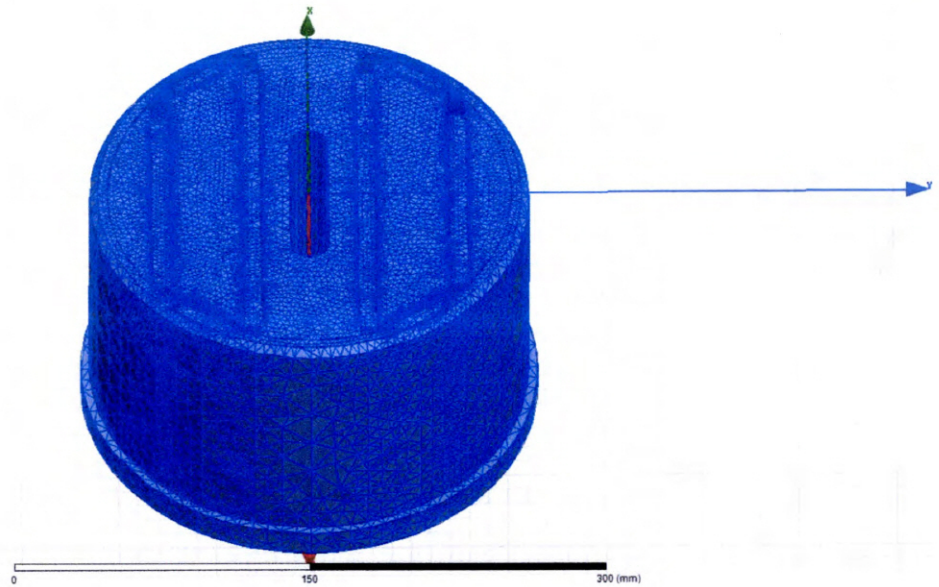


Рисунок 3.1 – Сітка скінченних елементів, побудована для системи діаметром 225 мм

У системах ловильних пристроїв магнітне поле створюється постійними магнітами. Відповідно до заданих властивостей матеріалів поширення магнітного поля залежить від просторового розподілу магнітної проникності. Розв'язок магнітостатичної польової задачі визначається відомими рівняннями Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}, \quad (3.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (3.4)$$

де $\vec{H}(x, y, z)$ – напруженість магнітного поля;

$\vec{J}(x, y, z)$ – густина струму;

$\vec{B}(x, y, z)$ – магнітна індукція.

Окрім того, використовується наступна залежність:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M}_p, \quad (3.5)$$

де $\vec{M}_p(x, y, z)$ – постійне намагнічування;

μ_0 – магнітна проникність вакууму (магнітна стала);

μ_r – відносна магнітна проникність.

У розрахунках Maxwell враховує нелінійні властивості як постійних магнітів, так і магнітом'яких матеріалів. У випадку, якщо постійні магніти працюють нижче "коліна" кривої розмагнічування, Maxwell дає можливість одержати розв'язок, ґрунтуючись на раніше розрахованій робочій точці. Магнітопроводи в магнітних системах працюють на межі насичення, тому їх властивості потрібно задавати кривими намагнічування. З їх допомогою одержуємо нелінійний тензор магнітної проникності, що використовується в ітераційному процесі вирішення Ньютона-Рафсона:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + [\tilde{\mu}] \cdot (\vec{H} - \vec{H}_0), \quad (3.6)$$

$$[\tilde{\mu}] = \frac{\partial}{\partial \vec{H}} \vec{B} = [\Delta\tilde{\mu}] + [\mu], \quad (3.7)$$

де \vec{B}_0 та \vec{H}_0 – попередні польові розв'язки;

$[\Delta\tilde{\mu}]$ – загальний повний тензор.

Для $[\mu]$ дається наступне визначення:

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_x & & \\ & \mu_y & \\ & & \mu_z \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де μ_x, μ_y, μ_z враховують анізотропні властивості матеріалу.

Під час розв'язку тривимірних магнітостатичних задач розглядається магнітне поле H з наступними компонентами:

$$\vec{H} = \vec{H}_p + \nabla\varphi + \vec{H}_c, \quad (3.9)$$

де φ – магнітний скалярний потенціал;

\vec{H}_p – локальний розв'язок, одержаний шляхом присвоєння ребрам сітки значень, встановлених законом Ампера для всіх контурів усіх граней тетраедрів у сітці;

\vec{H}_c – поле, що створюється постійними магнітами.

Тобто, змінні величини в розрахунку – це вузлові значення магнітного скалярного потенціалу (десять значень у кожному тетраедрі), при цьому забезпечується квадратична апроксимація всередині кожного скінченного елемента. Основною перевагою даної методики є використання значно менше обчислювальних ресурсів за рахунок скалярного характеру величин.

На основі аналізу існуючих методів розрахунку магнітних полів можна стверджувати, що найдоцільнішим для проектування і дослідження магнітних систем ловильних пристроїв є МСЕ. Даний метод реалізований в багатьох програмних засобах і кожен з них можна використовувати для розрахунку електромагнітних полів. Найбільш придатними для розрахунку та побудови магнітних полів є спеціалізовані продукти, яким є ANSYS Maxwell. Унікальні алгоритми, закладені в програмний комплекс дають можливість розв'язувати лінійні та нелінійні тривимірні задачі магнітостатики швидко та з високою точністю.

3.2 Моделювання і розрахунок магнітних систем з раціональними геометричними параметрами

Проектування магнітних систем передбачає вибір матеріалів постійних магнітів і магнітопроводів, конфігурації та оптимальних розмірів елементів систем. Необхідно враховувати умови роботи пристроїв на вибої свердловин, а саме: наявність промивальної рідини і шару шламу між предметами та системою, температуру та інші. Високі характеристики магнітних ловильних пристроїв можна одержати шляхом вибору сучасних якісних матеріалів або вдосконаленням конструкції, що забезпечить значну кількість варіантів

магнітних систем. Так як вартість магнітної системи складає більше 50 % вартості пристрою, то необхідні магнітні поля в робочих зазорах повинні створювати системи з мінімальними витратами та з ефективним використанням властивостей матеріалів.

Магнітні системи ловильних пристроїв складаються з постійних магнітів і магнітопроводів, що трансформують та направляють магнітний потік у робочу ділянку пристрою. Постійний магніт створює потік, пропорційний до залишкової індукції матеріалу та площі полюсів магніта. Магнітний потік у магнітопроводі пропорційний площі його перерізу та індукції насичення матеріалу. Для того, щоб магнітопроводи перебували в стані насичення, потрібно, щоб постійний магніт створював магнітний потік більший пропускну здатності магнітопроводів. Тоді одержуємо максимальну підймальну силу (зусилля притягання) ловильного пристрою.

Згідно з формулою Максвелла (2.1), зусилля притягання пропорційне квадрату магнітної індукції та площі магнітопроводів. Тому, більшу частину робочої поверхні магнітної системи повинні займати магнітопроводи. Важливим завданням є встановлення оптимальних співвідношень розмірів постійних магнітів і магнітопроводів, які з одного боку забезпечать високі силові характеристики пристроїв, з другого – раціональне використання енергії постійних магнітів і їх мінімальну вартість.

Варто зазначити, що вираз (2.1) можна використовувати для розрахунку лише за умови однорідного магнітного поля в зазорі між магнітною системою та притягуваним предметом, що практично не зустрічається. Тому будемо знаходити зусилля притягання за допомогою програмного комплексу ANSYS Maxwell.

Магнітна сила (взаємодія магнітного поля з феромагнітним предметом) в ANSYS Maxwell розраховується за принципом віртуальної роботи. Згідно з рис. 3.2, сила, що діє на плиту, рівна похідній енергії магнітного поля по координаті, яку сила прагне змінити:

$$F_{\text{плита}} = \frac{dW}{ds}, \quad (3.10)$$

де W – магнітна коенергія системи;

s – робочий зазор.

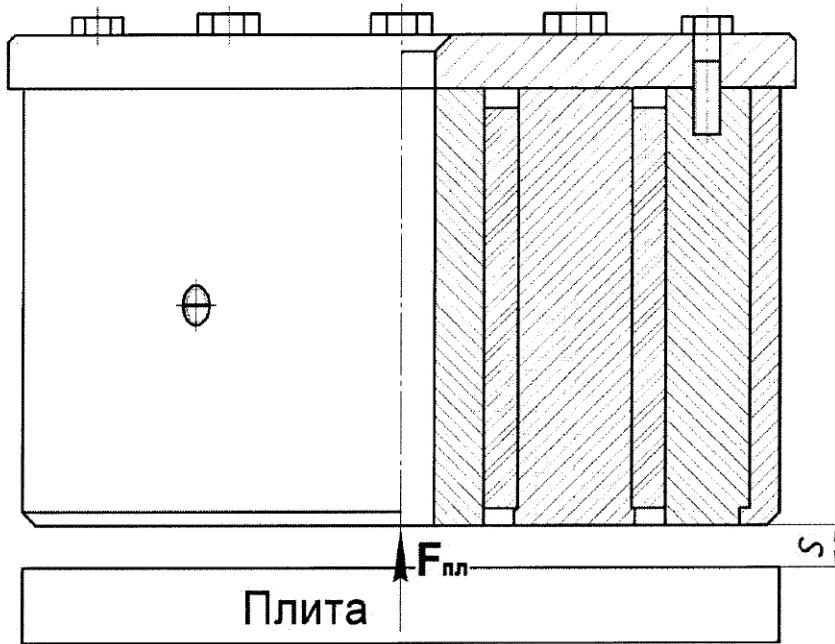


Рисунок 3.2 – Схема визначення сили, що діє на об'єкт

Магнітна коенергія для лінійних матеріалів визначається так:

$$W_c = \frac{1}{2} \int_V B \cdot H \, dV. \quad (3.11)$$

У випадку нелінійних матеріалів, коенергія є:

$$W_c = \int_V \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dV. \quad (3.12)$$

На відміну від класичного методу віртуальної роботи, плита залишається нерухомою в процесі обчислення сили. Замість цього, змінюються тетраедри, розташовані уздовж зовнішньої поверхні об'єкта.

Таким чином, для обчислення сили потрібен розрахунок магнітного поля.

Теоретичні дослідження вибору раціональних розмірів магнітів проводилися для системи із зовнішнім діаметром 150 мм, що містить центральний магнітопровід, виконаний у формі чотирикутної призми та чотири сегментні магнітопроводи протилежної полярності, між якими встановлено постійні магніти. Раніше (розділ 2) встановлено переваги використання рідкісноземельних постійних магнітів у системах ловильних пристроїв, тому для дослідження оберемо неодимові магніти марки N38.

У середовищі програми Solid Works побудовано тривимірні моделі магнітних систем із різними довжинами магнітів, а саме 6 мм, 8 мм, 10 мм та 12 мм (рис. 3.3). Розрахунок кожного з варіантів систем проводився методом скінченних елементів у пакеті програми ANSYS Maxwell 16.0, де вирішувалося завдання знаходження сили, що діє на феромагнітну плиту для зазору, який задавався параметрично. За результатами розрахунку були побудовані тягові характеристики – залежність вантажопідіймальної сили від величини робочого зазору, за якими оцінювали ефективність кожної системи.

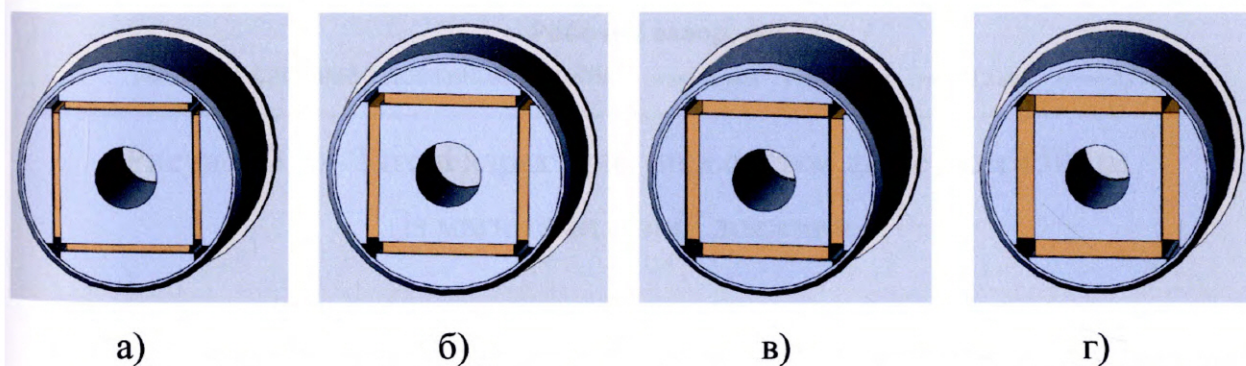


Рисунок 3.3 – Моделі магнітних систем діаметром 150 мм з довжиною магнітів 6 мм (а), 8 мм (б), 10 мм (в) та 12 мм (г)

Аналіз тягових кривих (рис. 3.4) показав, що максимальні значення вантажопідіймальної сили для систем з різною довжиною магнітів практично однакові. Зі збільшенням робочого зазору сила зменшується повільніше для системи з магнітами довжиною 12 мм. Це пояснюється більшою випуклістю магнітного поля, що залежить від відстані між полюсами, яка, зрозуміло, для

даної системи буде більшою. Системи з магнітами довжиною 6 мм та 8 мм мають значно крутішу тягову характеристику. Відомо, що магніти невеликої довжини менш термостабільні, тобто в них починають відбуватися незворотні магнітні втрати за температури нижчої, ніж у магнітів більшої довжини, виготовлених з того ж матеріалу. Тому використовувати в системах магніти довжиною 6 мм та 8 мм – недоцільно.

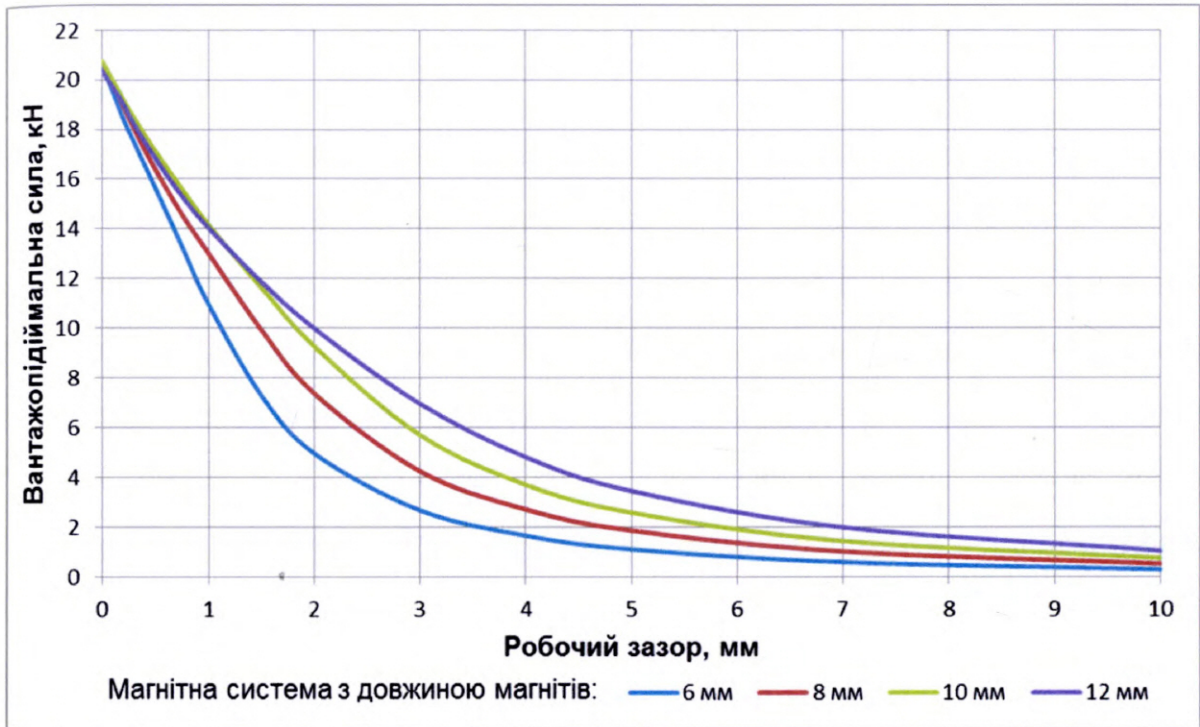


Рисунок 3.4 – Тягові характеристики систем діаметром 150 мм із магнітами різної довжини

Для рівномірного розподілу магнітної індукції по перерізу магнітопроводів потрібно, щоб сумарна площа магнітопроводів одного полюса відповідала другому [61]. У випадку системи з центральним чотирикутним магнітопроводом, його площа повинна бути рівною площі чотирьох сегментних магнітопроводів та кожуха. Ця умова виконана для компоновки системи постійними магнітами довжиною 10 мм. Отже, для магнітної системи діаметром 150 мм встановлюємо оптимальну довжину магнітів 10 мм [14].

Постійні магніти довжиною 10 мм будемо використовувати також у системах діаметром 112 мм та 225 мм. У магнітних системах із зовнішніми діаметрами 73 мм, 81 мм, 95 мм для забезпечення вказаної вище вимоги використаємо магніти довжиною 8 мм.

У розрахунках вибору оптимальної довжини магніту висота магнітної системи приймалася рівною 100 мм. Для визначення раціональних розмірів системи, за яких максимально буде використовуватися енергія постійних магнітів, проведемо дослідження вантажопідіймальної сили з висотою системи від 40 мм до 120 мм.

Результати (рис. 3.5) показують, що зі збільшенням висоти системи зростає вантажопідіймальна сила. Проте, за певного значення висоти відбувається насичення магнітопроводів і відповідно підвищується магнітний опір ділянки проходження магнітного потоку. Так, після досягнення висоти системи 80 мм подальший приріст сили складає всього 1-2 % зі збільшенням розмірів системи на 9-14 % (табл. 3.1). Таким чином, високі силові характеристики системи діаметром 150 мм можна одержати в діапазоні висот від 70 мм до 80 мм. Подальше збільшення висоти системи призводить до необґрунтованої витрати матеріалів.

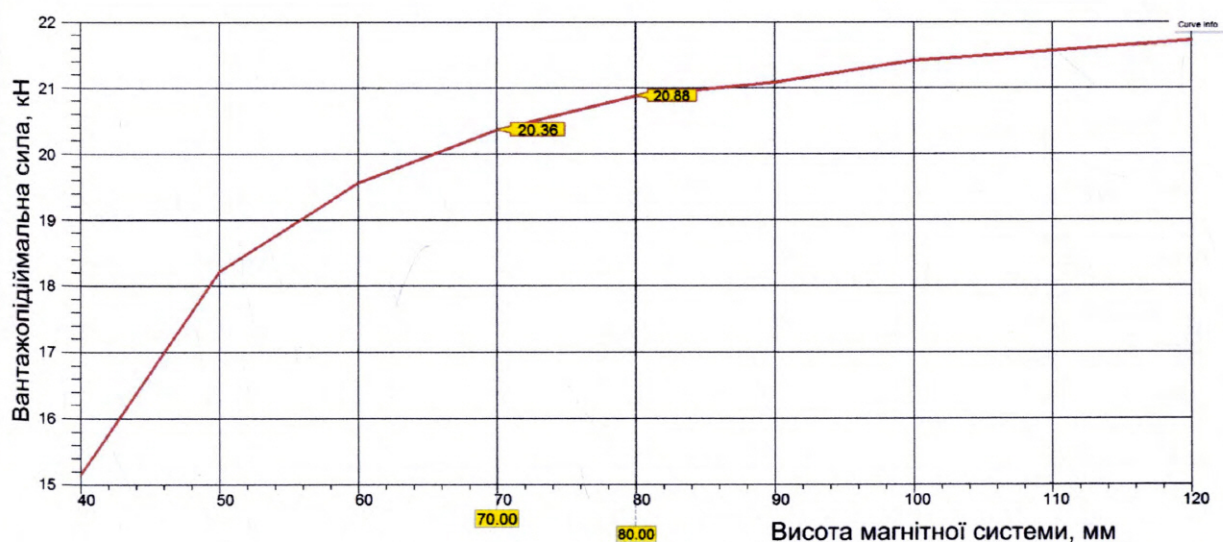


Рисунок 3.5 – Залежність вантажопідіймальної сили від висоти магнітної системи діаметром 150 мм

Таблиця 3.1 – Вантажопідіймальна сила для різної висоти системи

Висота магнітної системи Н, мм	Вантажопідіймальна сила F, кН	Приріст довжини ΔL , %	Приріст сили ΔF , %
40	15,15	-	-
50	18,21	+25	+20,2
60	19,55	+20	+7,3
70	20,36	+16,7	+4,1
80	20,87	+14,2	+2,5
90	21,07	+12,5	+0,9
100	21,41	+11,1	+1,6
110	21,55	+10	+0,6
120	21,71	+9	+0,7

Для розрахунку поля з метою встановлення ділянок з максимальною густиною магнітного поля, а також розсіювання магнітних потоків моделювалася система висотою 70 мм. Аналізуючи результати (рис. 3.6) можна стверджувати, що максимумами магнітної індукції спостерігаються на ребрах і вершинах магнітопроводів, що пояснюється найбільшою густиною силових ліній в цих ділянках. Відповідно і уловлювані предмети будуть розташовуватися в цих ділянках, залишаючи вільним промивальний отвір. Розподіл магнітної індукції однаковий на робочій та неробочій поверхнях магнітної системи. Під час моделювання з феромагнітною плитою (рис. 3.7) відбувається перерозподіл магнітного поля в магнітопроводах, внаслідок чого індукція на робочій поверхні системи досягає значення 2,1 Тл, тобто магнітопроводи у нижній частині перебувають у стані, близькому до насичення. Кожух у даній системі також виконує функцію магнітопровода. Віддалене розташування від постійних магнітів ускладнює процес його намагнічування. А, як відомо, одержання максимальної можливої індукції на всій площі полюсів системи є однією з вимог до магнітних систем. Тому, зменшивши поперечний переріз кожуха в місці контакту з плитою, вдалося підвищити індукцію практично до насичення.

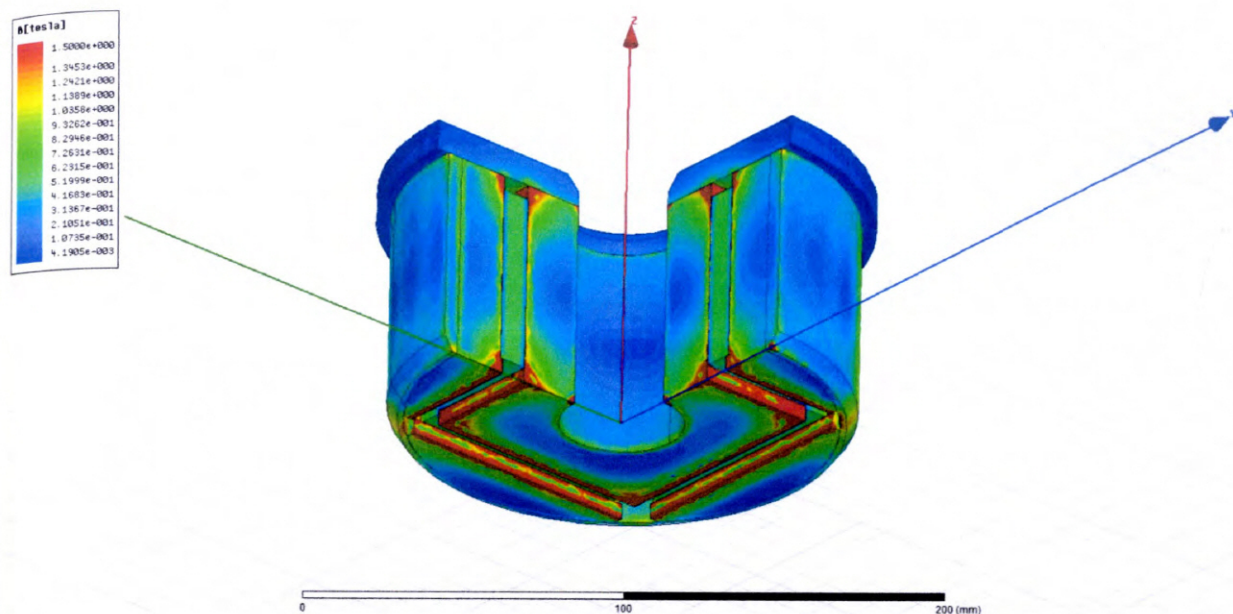


Рисунок 3.6 – Розподіл магнітної індукції в системі без феромагнітної плити

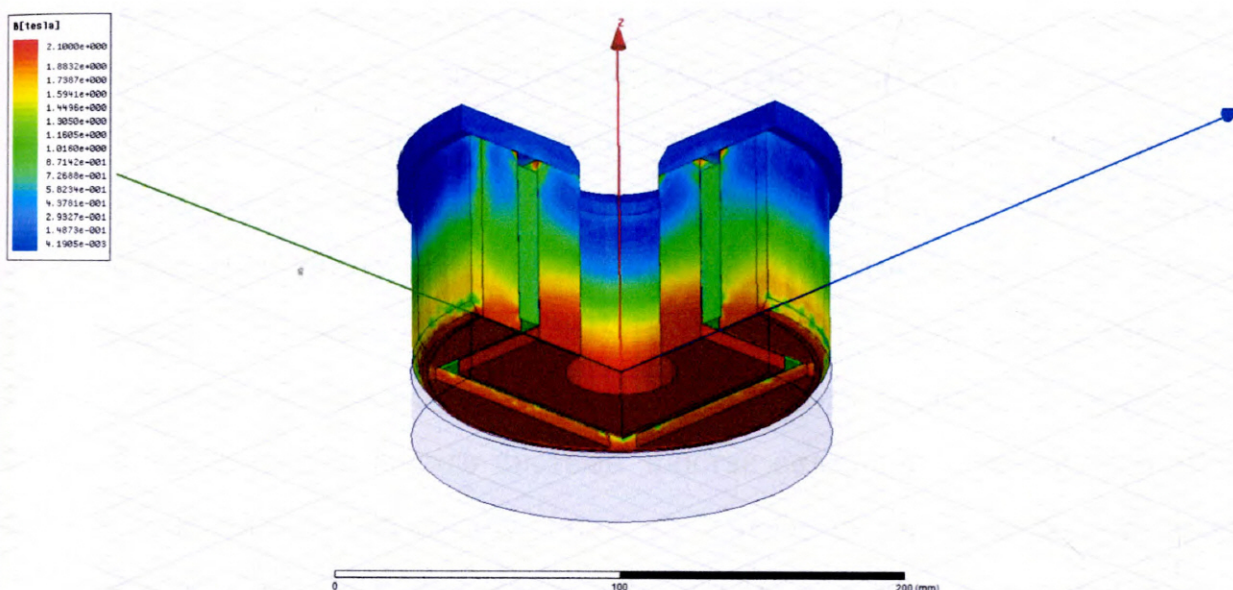


Рисунок 3.7 – Розподіл магнітної індукції в системі з феромагнітною плитою

Таким чином, одержані моделі наглядно демонструють трансформацію магнітного потоку по висоті системи у випадку притягання до феромагнітної плити.

Аналогічні дослідження проводилися для системи діаметром 225 мм. Одержана графічна залежність (рис. 3.8) дала можливість встановити раціональний діапазон висоти системи (від 90 мм до 110 мм), за якого вантажопідіймальна сила близька до максимальної.

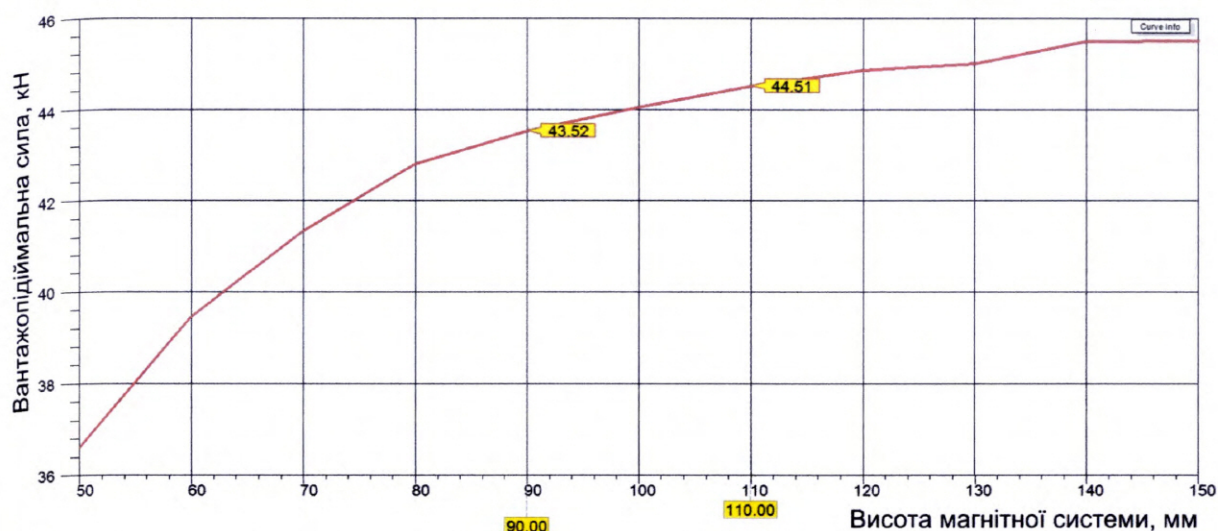
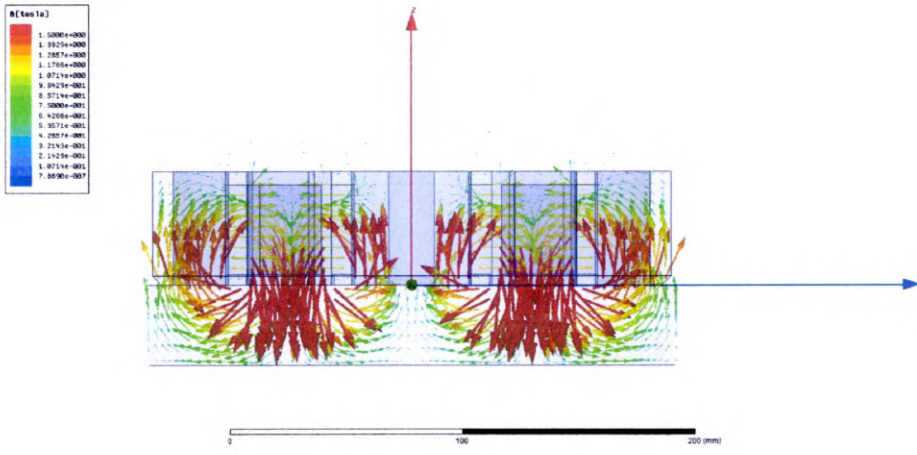


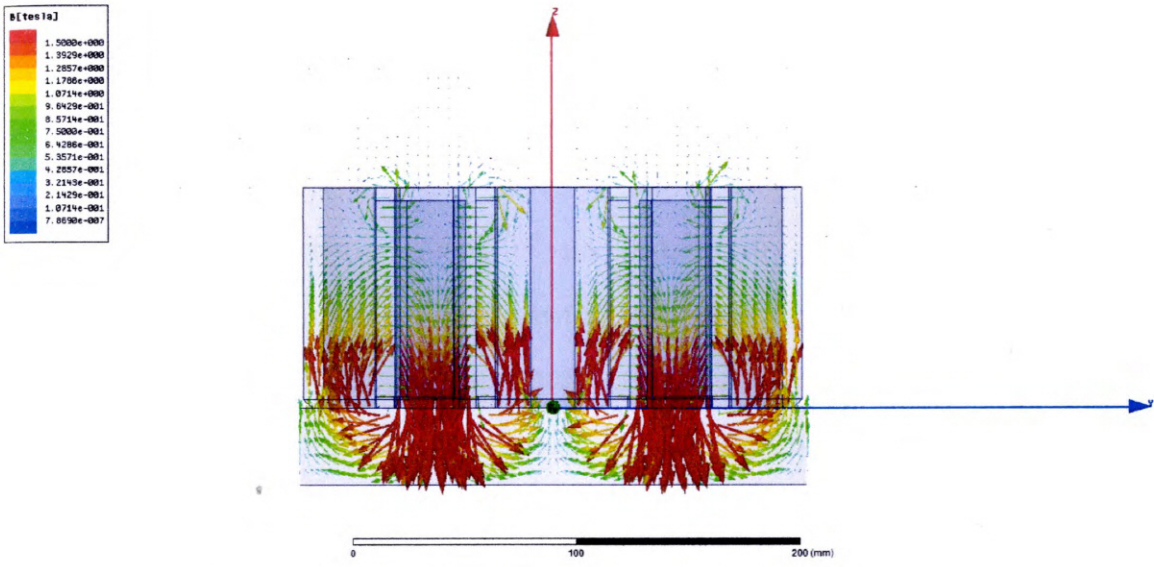
Рисунок 3.8 – Залежність вантажопідіймальної сили від висоти магнітної системи діаметром 225 мм

Важливою характеристикою магнітних систем є коефіцієнт розсіювання, тобто відношення повного магнітного потоку, який створюють постійні магніти, до корисного, який підводиться до робочого зазору. Чим менші потоки розсіювання, то краща система, адже більша частина потоку виконує корисну роботу з притягання металевих предметів. Згідно із даними графіка (рис. 3.8), малі значення висоти системи не дають змоги одержати високу вантажопідіймальну силу, тобто створюють недостатній магнітний потік. Зі збільшенням висоти системи зростає сила, проте також зростають потоки розсіювання магнітного поля на неробочій та боковій поверхнях системи (рис. 3.9). Це пояснюється насиченням матеріалу магнітопровода у нижній частині і відповідним збільшенням його магнітного опору, внаслідок чого все більше потоку замикається по повітрі. Тому вибрані вище значення висоти систем дають можливість зменшити потоки розсіювання та максимально використати властивості матеріалів магнітної системи.

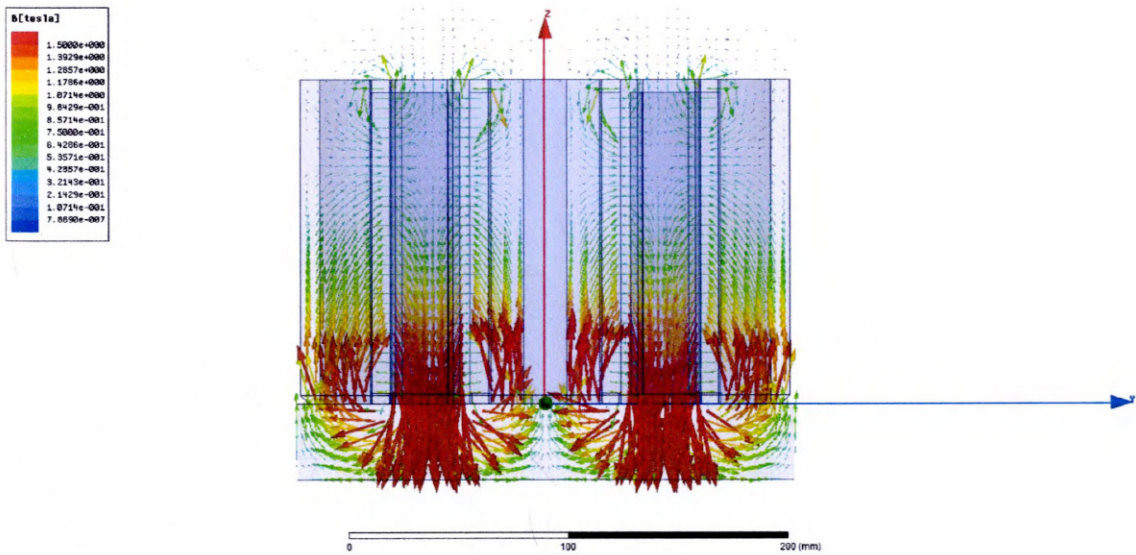
Тягову характеристику для висоти системи 100 мм зображено на рис. 3.10. Максимальне значення підіймальної сили становить 44,26 кН. Незважаючи на порівняно невелику довжину магнітів, застосованих у даній системі, високі значення сили залишаються і для зазорів до 4 мм. Це дасть змогу уловлювати аварійні предмети з шару шламу.



a)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Векторні графіки розподілу магнітної індукції для висоти системи 50 мм (а), 100 мм (б), 150 мм (в)

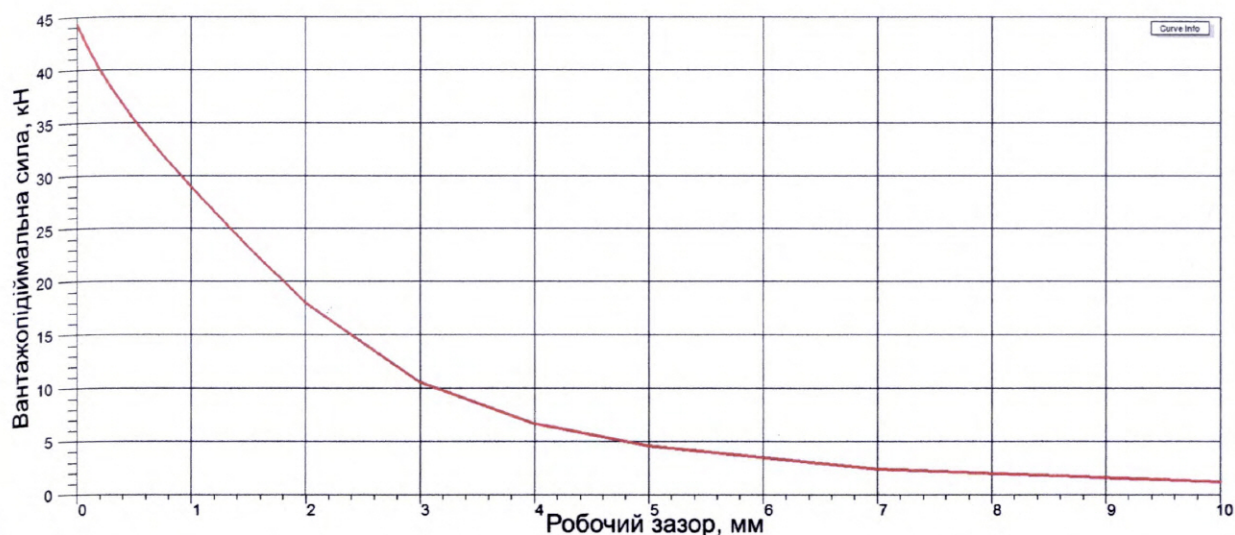


Рисунок 3.10 – Розрахункова тягова характеристика магнітної системи діаметром 225 мм

Розподіл магнітної індукції на поверхні та в перерізі системи зображено на рис. 3.11. Так само, як для системи з центральним чотирикутним магнітопроводом, найбільша концентрація силових ліній спостерігається на ребрах і вершинах магнітопроводів. Це підтверджують результати розподілу нормальної складової магнітної індукції по осевій та діагональній лінії (рис. 3.12). Окрім того, спостерігаються скачки значень індукції біля промивального отвору, що пояснюється суттєво різною магнітною проникністю на межі двох середовищ сталь-повітря.

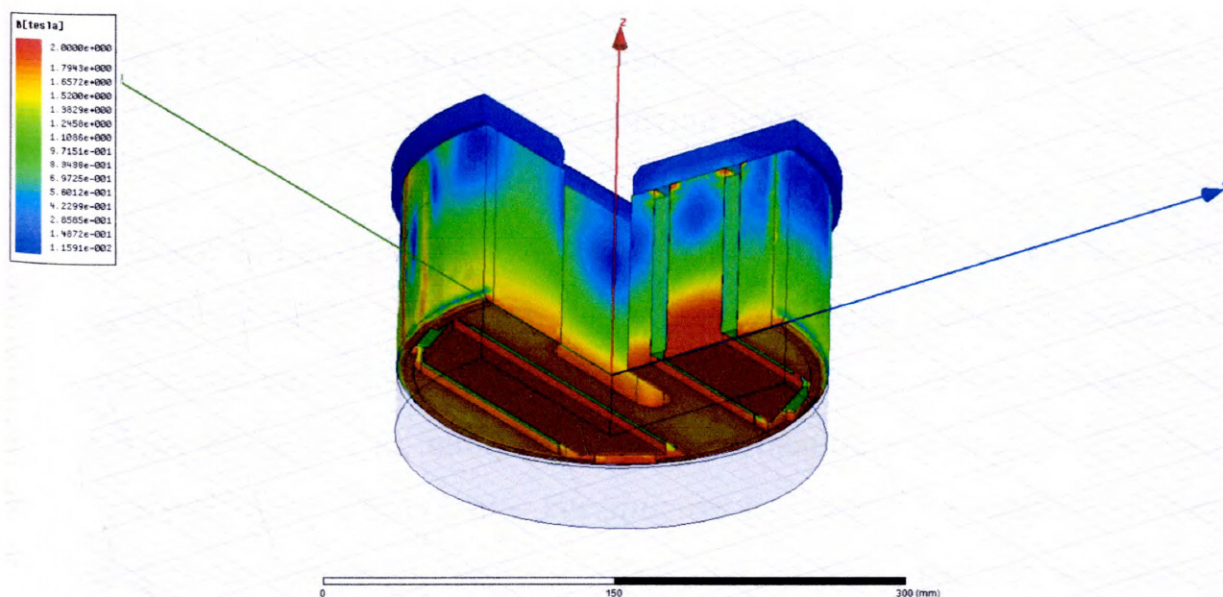
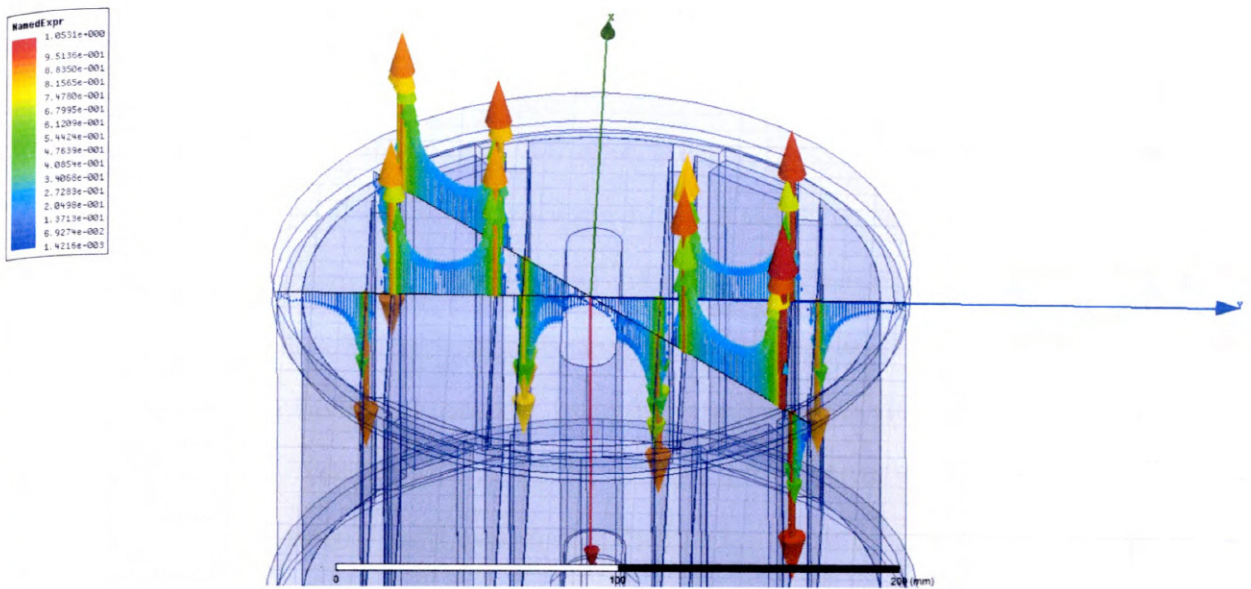
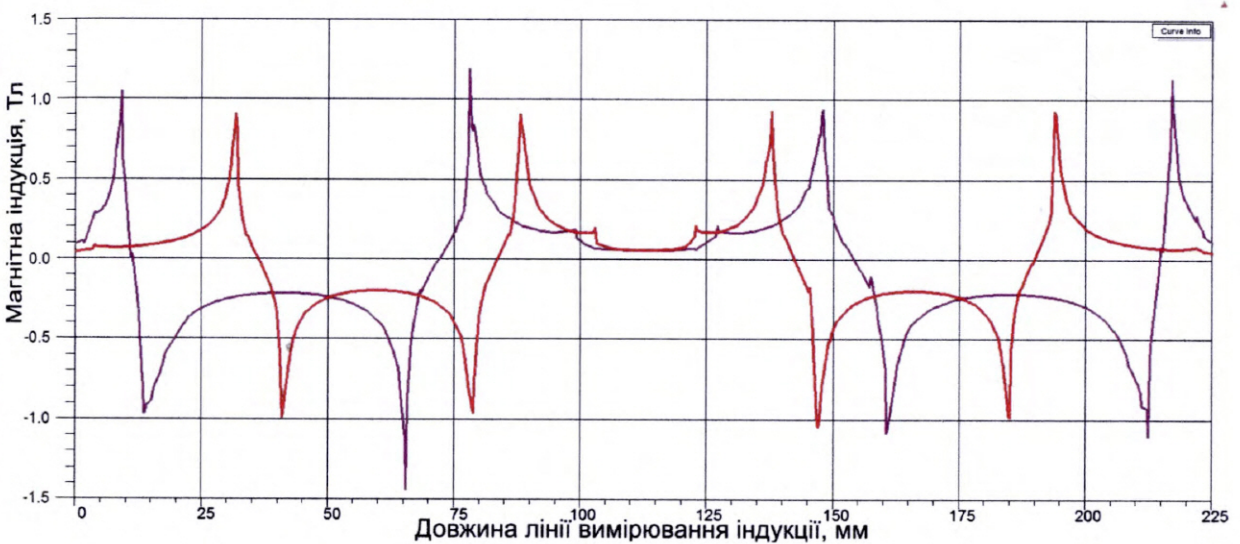


Рисунок 3.11 – Розподіл індукції на поверхні та в перерізі системи



а



б

Рисунок 3.12 – Векторний (а) та скалярний (б) графік розподілу нормальної складової магнітної індукції

Аналогічно встановлено оптимальні розміри магнітних систем решти діаметрів (табл. 3.2). Одержані теоретичні значення вантажопідіймальної сили магнітних систем визначених геометричних розмірів будемо оцінювати за силовим критерієм k_c , вибір якого обґрунтований в розділі 2. Для цього потрібно знайти його складові – коефіцієнти питомої k_n та загальної k_z сили. У розроблених системах середні значення питомої вантажопідіймальної сили, визначені розрахунковим шляхом, наближаються до теоретичного, що

становить $1,86 \text{ Н/мм}^2$ за індукції насичення $2,13 \text{ Тл}$ [61]. Тому коефіцієнт k_n , визначений за (2.6), знаходиться в межах $0,90-0,97$. Винятком є магнітна система пристрою діаметром 118 мм , де за рахунок зменшення довжини магнітів із 10 мм до 8 мм збільшилася площа магнітопроводів, що і зумовило зниження коефіцієнта k_n . Теоретичні значення загальної сили F визначалися за умови заповнення магнітопроводами всієї площі магнітної системи. Так як частину площі робочої поверхні системи займають промивальні отвори та постійні магніти, то, згідно з (2.5), одержано відносно невеликі значення коефіцієнта загальної підйимальної сили k_3 . Отже, силовий критерій k_c становить від $0,46$ до $0,6$ залежно від діаметра розробленої системи. Для порівняння визначено k_c для систем на ферито-барієвих магнітах, що змінюється в межах $0,15-0,22$ [3]. Для закордонних пристроїв критерій k_c розрахувати неможливо, оскільки невідома площа полюсів.

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри магнітних систем

Діаметр магнітної системи d , мм	Довжина магніту l_m , мм	Висота магнітної системи H , мм	Площа магнітопроводів (полюсів) $S_{мп}$, мм ²	Вантажопідймальна сила F , кН	Питома вантажопідймальна сила F_n , Н/мм ²	Коефіцієнт загальної підйимальної сили k_3	Коефіцієнт питомої сили k_n	Силовий критерій k_c
73	8	60	2283	4,1	1,80	0,54	0,97	0,52
81	8	60	2959	5,1	1,72	0,54	0,92	0,5
95 ¹⁾	10	60	4019	6,7	1,67	0,51	0,90	0,46
95 ²⁾	8	60	4625	7,2	1,56	0,55	0,84	0,46
112	10	70	6160	11,1	1,80	0,61	0,97	0,59
150	10	70	11242	20,4	1,81	0,62	0,97	0,6
225	10	100	25160	44,2	1,76	0,6	0,95	0,57

Примітки. ¹⁾ – для пристрою діаметром 115 мм ; ²⁾ – для пристрою діаметром 118 мм .

Необхідно зазначити, що в магнітних пристроях, призначених для проведення ловильних робіт без промивання вибою і спуско-підйимальні

операції проводяться на геофізичному кабелі, відсутні промивальні отвори, тому коефіцієнт використання площі зростає і, відповідно, вищими будуть силові показники.

Таким чином, запропонований силовий критерій дає можливість оцінювати ефективність використання енергії постійних магнітів у силовому вимірі, тобто досконалість магнітних систем ловильних пристроїв. Розроблені системи за силовим критерієм значно перевищують аналоги.

3.3 Визначення раціональних співвідношень елементів допоміжної утримувальної системи

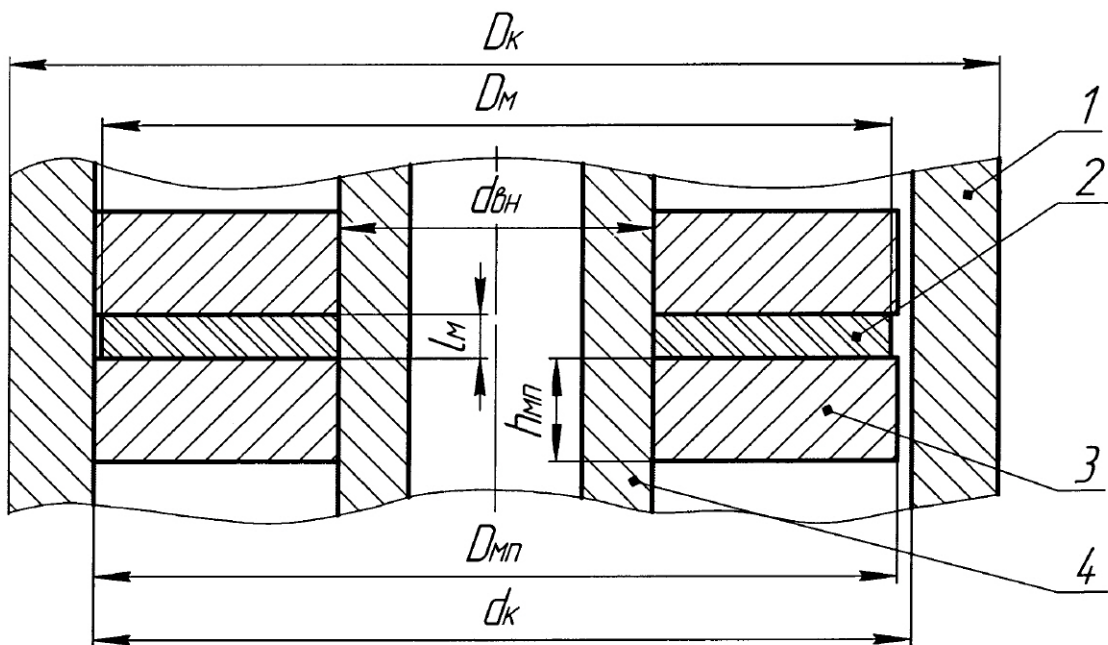
Під час підймання магнітних ловильних пристроїв на денну поверхню існує небезпека відриву уловлених металевих предметів від магнітної системи. Це спричиняє повторні аварії та подовжує час ловильних робіт. Для підвищення надійності вилучення видовжених феромагнітних уламків передбачено осьове переміщення основної уловлювальної системи, яка фіксується допоміжною системою у будь-якому положенні в корпусі.

Допоміжна система створює магнітне поле, яке взаємодіє із корпусом уловлювача. За рахунок переміщення систем збільшується об'єм порожнини корпусу для уловлення видовжених предметів. Основним силовим параметром допоміжної системи є зусилля зсуву, яке для кожного діаметра фрезера-уловлювача визначається залежно від рекомендованого осьового навантаження під час фрезерування та максимальної маси уловлених металевих частин. Для магнітних фрезерів із зовнішнім діаметром 136 мм максимальне осьове навантаження під час фрезерування становить 10 кН [29], тому максимальне зусилля зсуву обмежується цим значенням. Водночас, рухома система під час підймання фрезера-уловлювача на поверхню повинна надійно утримувати уловлені предмети. Практика експлуатації ловильних пристроїв такого діаметра показала, що маса уловлених предметів не перевищує 100 кг [3, 4, 18]. Отже, мінімальне значення зусилля зсуву – не

менше 1000 Н, максимальне – не повинно перевищувати 10 кН.

Зусилля зсуву F_{zc} системи пропорційне силі притягання F_{np} до корпусу з урахуванням коефіцієнта тертя, який у свою чергу залежить від шорсткості поверхонь магнітопроводів та корпусу і знаходиться в межах 0,205-0,245 [61]. При цьому потрібно враховувати, що магнітні сили змінюють характер зачеплення мікронерівностей контактуючих поверхонь, з'являється зубцевий ефект, що збільшує коефіцієнт тертя [72]. З іншого боку, магнітна система переміщується у середовищі промивальної рідини, що навпаки зменшить коефіцієнт тертя. Можна припустити, що ці два чинники взаємно компенсують дію один одного.

Отже, необхідна сила притягання допоміжної магнітної системи до корпусу становить від 4000 Н до 5000 Н. Зважаючи на деякі експлуатаційні чинники (вібрації, удари), що не враховуються під час моделювання, а також ймовірні менші реальні значення від розрахункових, прийmemo, що остаточна F_{np} не менше 5000 Н. Для створення заданої сили розроблена магнітна система, що складається із двох кільцевих магнітопроводів та розміщеного між ними рідкісноземельного постійного магніту (рис. 3.13).



1 – корпус; 2 – постійний магніт; 3 – магнітопровід; 4 – немагнітний патрубок

Рисунок 3.13 – Схема допоміжної системи

Розміщена в корпусі допоміжна система притягується частиною бокової поверхні до внутрішньої поверхні корпусу. За рахунок різниці діаметрів з протилежного боку утворюється технологічний зазор 1 мм. Враховуючи безпосередню близькість корпусу та його невелику товщину, для створення заданої $F_{пр}$ достатньо магніту довжиною 6 мм. Висоту магнітопроводів, що забезпечує силу притягання 5000 Н, знайдемо шляхом розв'язання параметричної задачі.

Розрахунок проводимо в середовищі ANSYS Maxwell 16.0. Висоту магнітопроводів $h_{мп}$ задаємо параметрично в діапазоні від 6 мм, що відповідає довжині магніту, до 24 мм з кроком 0,5 мм. За результатами дослідження встановлено найменше значення висоти магнітопроводів $h_{мп} = 7,93$ мм, за якого забезпечується сила притягання 5000 Н (рис. 3.14). Зі збільшенням $h_{мп}$ до 15 мм досягається максимальна сила 6258 Н. Збільшення $h_{мп}$ понад 20 мм призводить до зростання магнітного опору магнітопроводів, зменшення магнітної індукції та, як наслідок, падіння сили притягання.

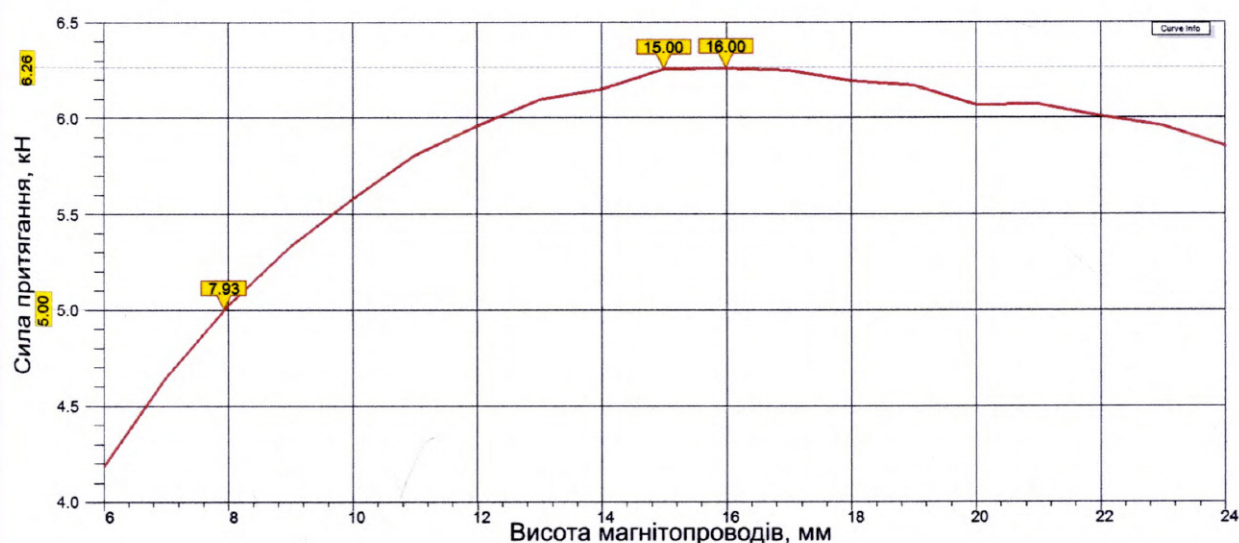
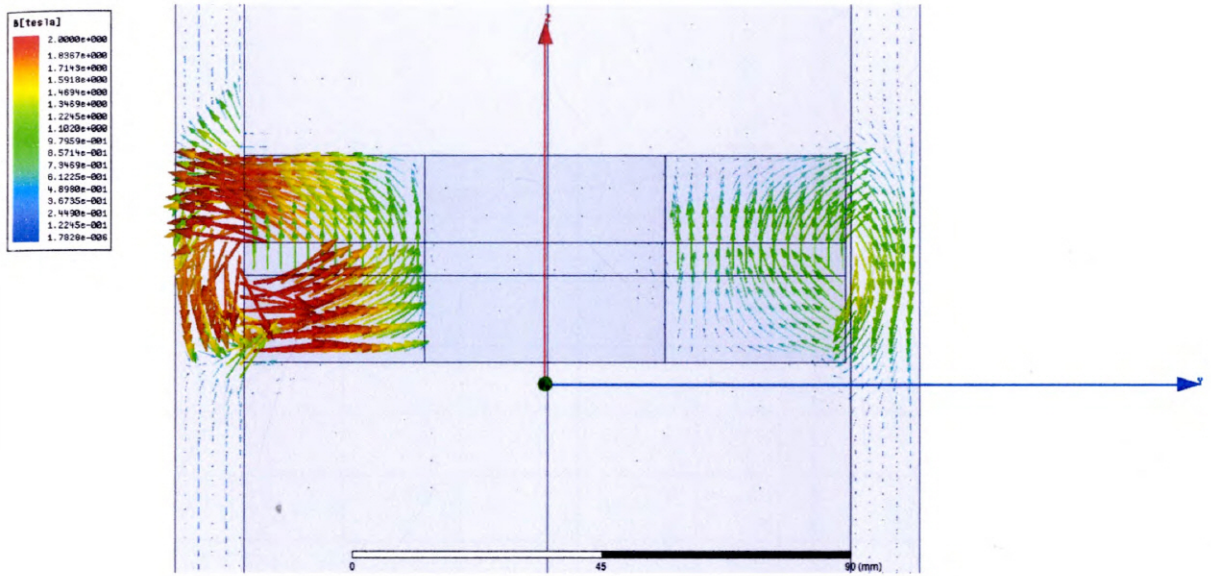


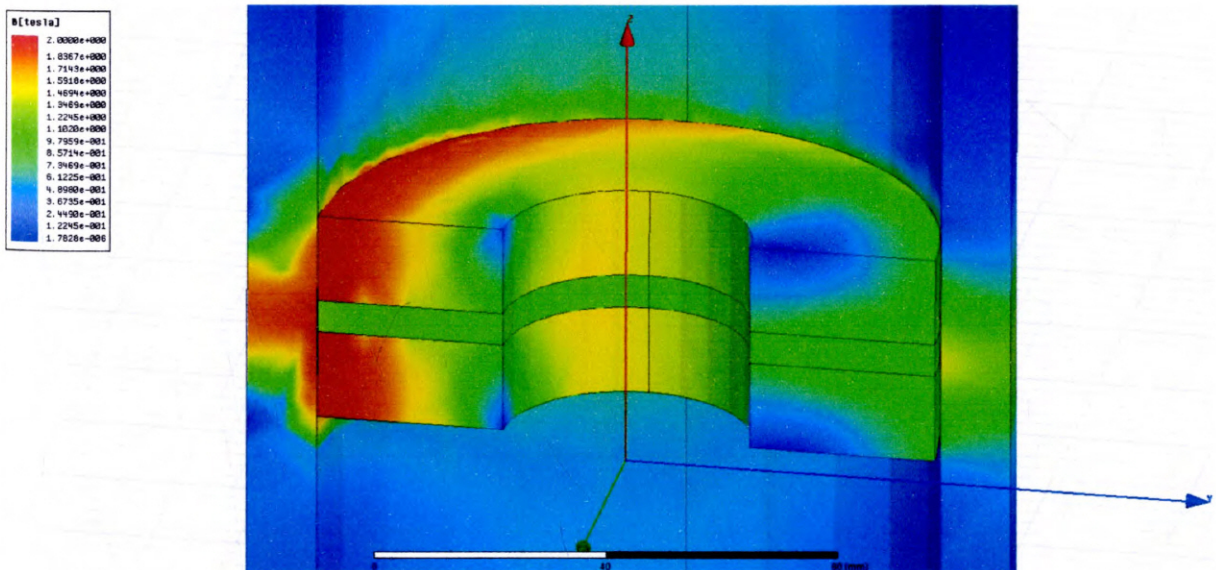
Рисунок 3.14 – Залежність сили притягання від висоти магнітопроводів

Таким чином можна стверджувати, що максимальні значення індукції досягаються в магнітопроводах висотою від 6 мм до 16 мм, а сила притягання зростає завдяки збільшенню площі контакту магнітної системи із корпусом.

Ексцентричне розміщення допоміжної системи в корпусі призводить до нерівномірного розподілу магнітного поля. Вивчення механізму взаємодії магнітного поля з корпусом проводилось на побудованій повнорозмірній моделі системи діаметром 110 мм. Аналіз векторного та скалярного розподілу магнітної індукції (рис. 3.15) дав змогу виявити нерівномірне насичення корпусу магнітними силовими лініями, розподіл індукції в магнітопроводах і корпусі та ділянки зі значним градієнтом магнітного поля.



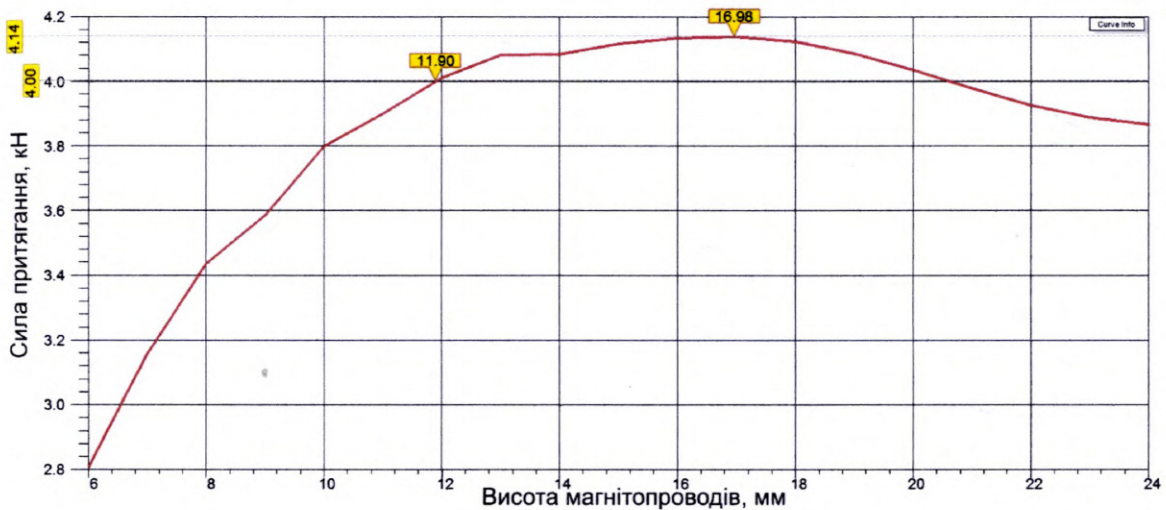
a)



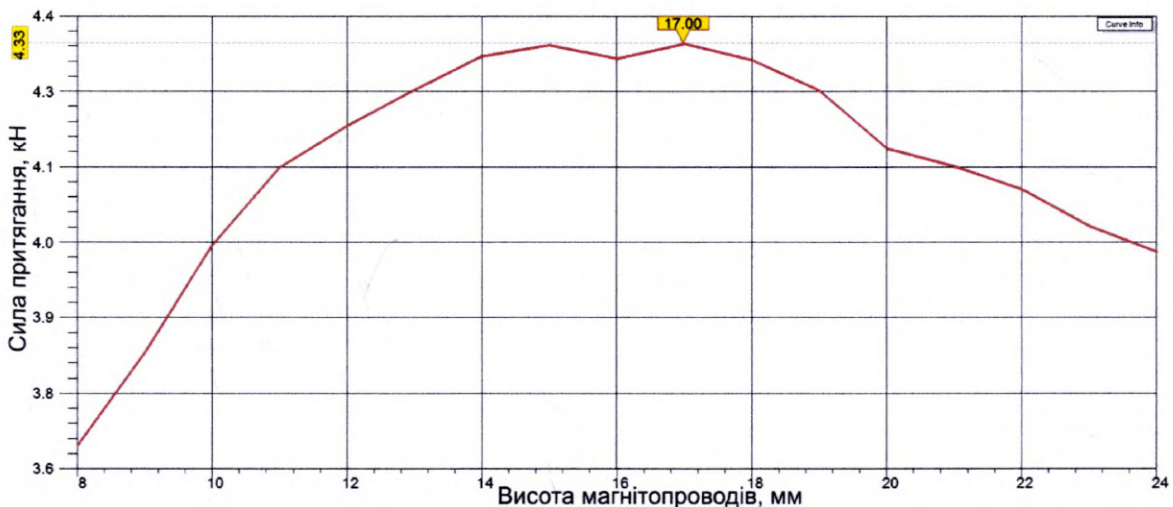
б)

Рисунок 3.15 – Векторний (а) та скалярний (б) розподіл магнітної індукції в корпусі та допоміжній системі

Аналогічним чином встановлено раціональні розміри допоміжної системи фрезера-уловлювача магнітного із зовнішнім діаметром 112 мм. Максимальна сила притягання становить 4140 Н за висоти магнітопроводу 17 мм (рис. 3.16, а). Це менше за встановлену раніше для пристрою діаметром 136 мм вимогу в 5000 Н. Проте необхідно врахувати, що основна система даного фрезера теж буде розвивати меншу підймальну силу порівняно з пристроєм діаметром 136 мм. Тобто сили притягання в 4000 Н буде більш ніж достатньо для надійного вилучення всіх металевих предметів на поверхню.



а)



б)

а – довжина магніту 6 мм; б – довжина магніту 8 мм

Рисунок 3.16 – Залежність сили притягання від висоти магнітопроводів

Для одержання такої сили потрібно компонувати систему магнітопроводами висотою не менше 12 мм (рис. 3.16, а). Встановлено також, що збільшення довжини магніту до 8 мм не призводить до суттєвого зростання сили притягання (рис. 3.16, б), тому використовувати магніти більшої довжини, ніж 6 мм нераціонально.

Одержані графічні залежності дають можливість визначити висоту магнітопроводів для будь-якого зусилля зсуву допоміжної системи діаметром 90 мм та 110 мм у визначених межах. За необхідності збільшення зусилля зсуву потрібно компонувати систему двома постійними магнітами і трьома магнітопроводами.

Геометричні розміри і силові показники проєктованих допоміжних магнітних систем наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри магнітних систем

Параметр	Типорозмір	
	ФУМ-112	ФУМ-136
Зовнішній діаметр корпусу D_k , мм	112	136
Внутрішній діаметр корпусу d_k , мм	91	111
Зовнішній діаметр магнітопроводів D_{mp} , мм	90	110
Зовнішній діаметр магнітів D_m , мм	88	108
Внутрішній діаметр системи d_{bn} , мм	33	42
Висота магнітопроводів h_{mp} , мм	12	8
Довжина магнітів l_m , мм	6	6
Сила притягання F_{np} , Н	4000	5000
Зусилля зсуву F_{zc} , Н	800	1000

Отже, для магнітних фрезерів-уловлювачів із зовнішніми діаметрами 136 мм та 112 мм запропоновано конструкції рухомих систем, що складаються з кільцевого магніту і двох кільцевих магнітопроводів. За допомогою моделювання визначено раціональні розміри елементів систем і встановлено їх силові параметри.

3.4 Дослідження впливу температури на силові параметри магнітних систем

Під час експлуатації на значних глибинах магнітні ловильні пристрої піддаються впливу високих температур. Як відомо, параметри постійних магнітів змінюються внаслідок дії зовнішніх умов. Тому важливо встановити вплив високих температур на характеристики магнітних систем і визначити верхню межу їх використання.

Рідкісноземельні неодимові магніти мають порівняно низьку максимальну робочу температуру – від 80 °С до 200 °С. За її перевищення внаслідок магнітної нестабільності відбуваються незворотні зміни, які можна усунути лише повторним намагнічуванням магніту. Зворотні зміни властивостей магнітів мають місце в межах робочої температури і визначаються температурними коефіцієнтами магнітної індукції та коерцитивної сили. Окрім того, зворотні зміни магнітного поля залежать від конструкції системи, а також співвідношень розмірів її елементів [7].

Постійні магніти є складовими частинами магнітних систем, тому їх розмагнічувальний чинник зменшується і незворотні втрати магнітного потоку виникатимуть за вищих температур. Визначити конкретні значення температур, за яких з'являються незворотні зміни, можна лише в процесі експериментальних досліджень ловильних пристроїв.

Температурні коефіцієнти зміни магнітної індукції α , коерцитивної сили β для магнітів Nd-Fe-B від'ємні та становлять $-(0,08-0,12)\%/^{\circ}\text{C}$ і $-(0,55-0,65)\%/^{\circ}\text{C}$ згідно [7]. Отже, підвищення температури буде призводити до зменшення магнітних параметрів системи.

Проведемо дослідження впливу температури на підймальну силу основної магнітної системи ловильного пристрою діаметром 136 мм. Для теоретичних досліджень оберемо неодимові магніти марки N38 з максимальною робочою температурою 80 °С. Розрахунок виконуємо в середовищі ANSYS Maxwell 16.0. Для встановлення впливу температури

задаємо внутрішню криву розмагнічування постійного магніту для температури 20 °С (рис. 3.17) [75]. Зі зміною температури Maxwell автоматично перебудовує криві розмагнічування згідно з температурною залежністю залишкової магнітної індукції та коерцитивної сили.

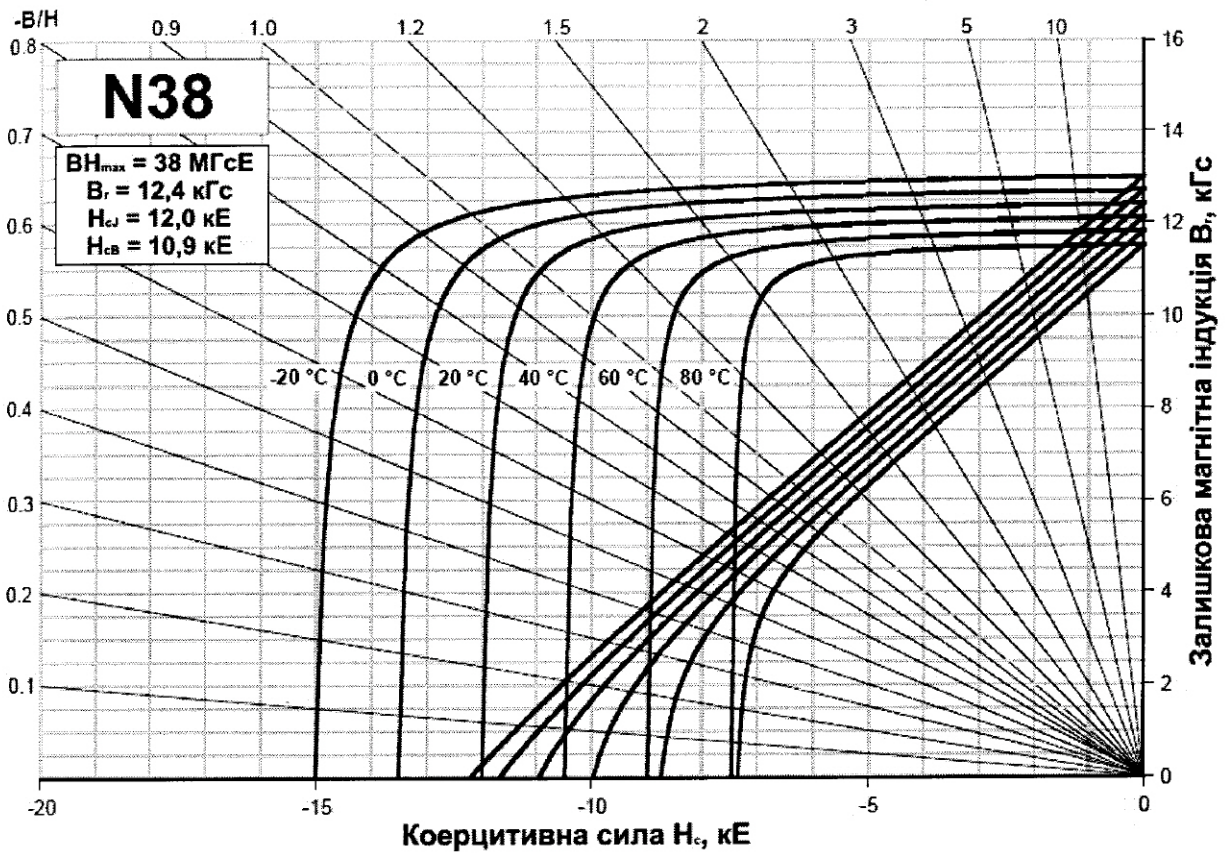


Рисунок 3.17 – Криві розмагнічування магніту марки N38 залежно від робочої температури

Аналізуючи одержані результати (рис. 3.18) бачимо, що сила притягання системи зменшується на 5,5 % із досягненням робочої температури магнітів. Це досить прийнятний показник, враховуючи той факт, що після повернення до початкових умов підймальна сила повернеться до максимального значення. Проте, зі збільшенням температури до 120 °С, сила зменшується уже на 12 %, а з досягненням 150 °С – на 18 %. Дана система в складі ловильного пристрою призначена для роботи на глибинах до 5000 м, де вибійна температура може досягати 120 °С і більше. Тому

використання магнітів марки N38 може призвести до їх часткового розмагнічування, а отже, зменшення параметрів системи.

Проведемо розрахунок з постійними магнітами з максимальною робочою температурою 120 °С та аналогічними магнітними характеристиками. Результати (рис. 3.19) показують зменшення сили лише на 5 % із досягненням верхньої межі робочої температури.

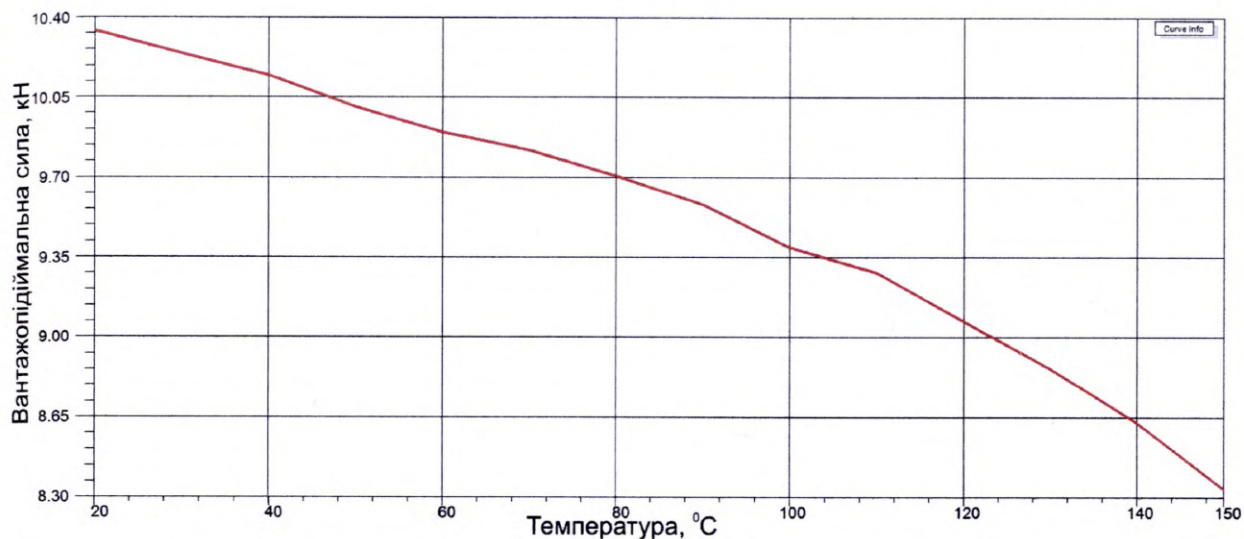


Рисунок 3.18 – Залежність сили притягання від температури для постійних магнітів марки N38

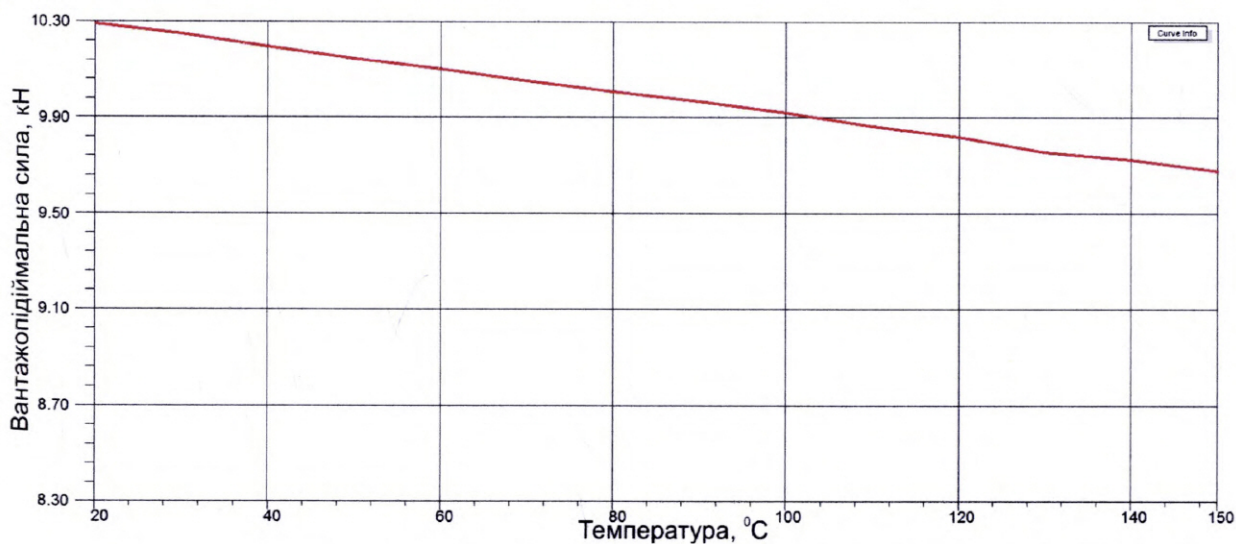


Рисунок 3.19 – Залежність сили притягання від температури для постійних магнітів марки N38H

Термостабільність магнітних матеріалів також залежить від геометричної форми. Так, у магнітів меншої довжини незворотні магнітні втрати відбуватимуться за дещо нижчої температури, а довгих – за температури, вищої за робочу. Тепловий вплив на поведінку розмагнічування досліджувався для системи, скомпонованої з магнітів довжиною 10 мм. Так як в системах пристроїв невеликого діаметру використовуються магніти довжиною 8 мм, то їх температурна стабільність буде меншою. З метою запобігання незворотних втрат магнітних властивостей рекомендовано в магнітних системах ловильних пристроїв застосовувати магніти з робочою температурою, більшою від температури на вибої свердловини.

Отже, встановлено вплив температури на магнітні характеристики систем ловильних пристроїв. На основі одержаних результатів можна стверджувати, що неодимові магніти з робочою температурою до 80 °С можна використовувати лише для неглибоких свердловин. Для свердловин з високою вибійною температурою потрібно обирати магніти з максимальною робочою температурою 120-150 °С.

Висновки до розділу 3

1. На основі аналізу існуючих методів розрахунку магнітних полів встановлено, що найбільш придатними для проектування магнітних систем є чисельні методи, а саме МСЕ, які дають можливість розраховувати магнітні системи зі складною геометрією та нелінійними властивостями матеріалів.

2. За допомогою програмного комплексу ANSYS Maxwell досліджено процес перерозподілу магнітних потоків під час взаємодії магнітних систем із ферромагнітним предметом. Визначено оптимальні геометричні розміри елементів систем з мінімальними потоками розсіювання, що дає змогу максимально використовувати енергію постійних магнітів.

3. Розроблено магнітні системи на рідкісноземельних неодимових магнітах, які володіють високими силовими характеристиками, а саме

умовною та питомою (до $1,8 \text{ Н/мм}^2$) вантажопідіймальною силою. За силовим критерієм проєктовані системи в три рази перевершують відомі аналоги на ферито-барієвих магнітах.

4. У результаті моделювання процесу взаємодії допоміжної системи з корпусом визначено оптимальні співвідношення кільцевих елементів систем, за яких досягається необхідне зусилля переміщення.

5. Досліджено вплив високих температур на силові характеристики систем на неодимових магнітах різної температурної стабільності. Встановлено можливість експлуатації розроблених магнітних систем за температури до $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

4.1 Методика і технічні засоби експериментальних досліджень

Невід'ємною частиною процесу створення, вдосконалення і виготовлення магнітних ловильних пристроїв є експериментальний метод досліджень, як один із ефективних для визначення та оцінки їх характеристик.

Основними характеристиками ловильних пристроїв є загальна і питома вантажопідіймальна сила, тягова характеристика, зусилля зсуву, магнітна індукція на робочій поверхні системи, топографія магнітного поля, а також механічна міцність і стабільність параметрів в умовах експлуатації.

Метою експериментальних досліджень є визначення і порівняльний аналіз основних характеристик розроблених систем ловильних пристроїв, дослідження впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників, встановлення відповідності одержаних результатів з теоретичними дослідженнями, визначення можливості ефективного використання створених пристроїв для ловильних робіт у нафтогазових свердловинах.

Для встановлення досконалості конструкції магнітної системи необхідно визначити характер розподілу магнітної індукції на поверхні магнітопроводів і в зазорах, виявити інтенсивність магнітного поля в окремих точках системи.

Відомо велику кількість методів і засобів досліджень магнітних характеристик систем на основі постійних магнітів [99-102]. Проте, вибір того чи іншого методу залежить від призначення і конструктивних особливостей магнітних систем, умов експерименту і величини контрольованих параметрів.

Для вимірювання магнітної індукції в окремих точках магнітних

систем використовувався тесламетр ЭМ 4305, призначений для вимірювання індукції постійних магнітних полів. Діапазон вимірювання – 0-1500 мТл, клас точності – 4,0, похибка вимірювань не перевищує $\pm 4,0$ %.

Дослідження топографії магнітного поля на робочих поверхнях систем здійснювали за допомогою розробленого в ІФНТУНГ устаткування для контролю силових і магнітних характеристик пристроїв для очищення вибоїв свердловин [3, 100]. Устаткування містить вимірювальний зонд із давачем Холла, пристрій для переміщення зонда, тесламетр ЭМ 4305, реєструвальний прилад. Діапазон вимірювання магнітної індукції – 0-1500 мТл, швидкість переміщення давача Холла – від 2,5 мм/с до 10 мм/с. Тарування давача здійснювалося за допомогою електромагніта ФЛ-1 та тесламетра ЭМ 4305. Похибка вимірювань не більше $\pm 4,0$ %.

Для одержання реальної картини розподілу магнітного поля на робочих поверхнях розроблених магнітних систем різних конструкцій вимірювання індукції проводилося:

- по лінії, перпендикулярній граням центрального чотиригранного магнітопроводу та пластинчастих магнітопроводів;
- посередині грані тригранного центрального магнітопроводу;
- по діагоналі центральних і проміжних магнітопроводів.

Для визначення силових параметрів систем на основі постійних магнітів існують низка методів, які відрізняються використанням обладнання, пристроями, вимірювальними засобами та методикою їх проведення [3, 47, 65, 66, 103].

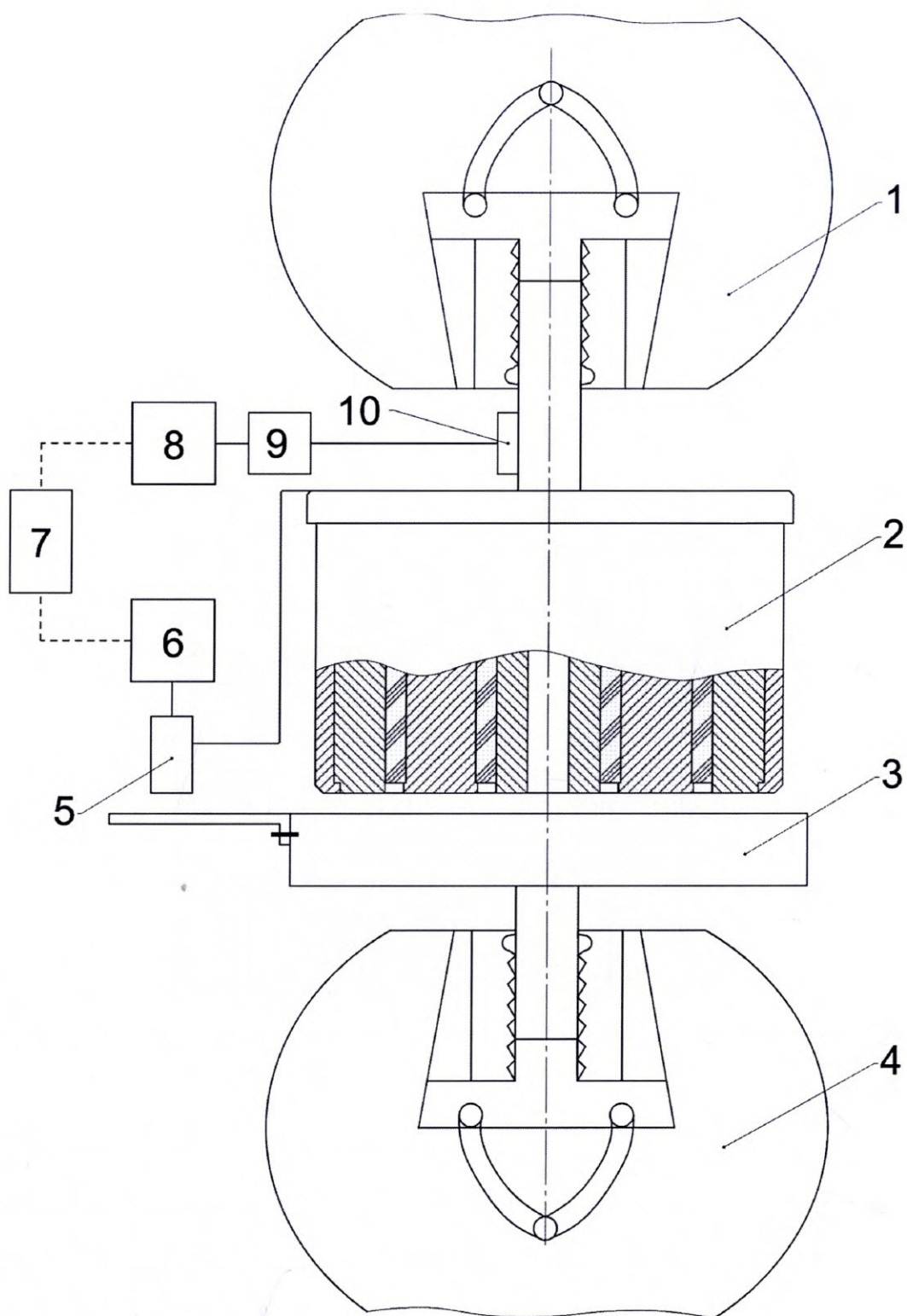
Показником призначення магнітних ловильних пристроїв є умовна вантажопідіймальна сила, яка в основному визначається шляхом відриву магнітної системи від випробувальної плити, що повністю перекриває її робочу поверхню. Даний показник є основним критерієм, за яким перевіряються результати розрахунків, визначають середнє значення питомої вантажопідіймальної сили і технічний рівень ловильних пристроїв.

Умовна вантажопідіймальна сила фрезерів-уловлювачів типу ФМ визначається шляхом підвішування до магнітної системи тарованих вантажів масою, вказаною нормативною технічною документацією [47]. Такий метод вимагає вантаж відповідної маси для кожного типорозміру фрезера, дає можливість визначати тільки одне значення вантажопідіймальної сили, а тому не може бути використаний для досліджень.

Для вимірювання тягових зусиль магнітних пристроїв Кокоріним О. Є. [65] розроблено експериментальне устаткування, яке дає можливість визначати умовну вантажопідіймальну силу за різних значень робочого зазору. Устаткування просте в експлуатації, але для досліджень потребує каліброваних немагнітних пластин для регулювання зазору, набору динамометрів та не забезпечує необхідну точність експерименту.

Найбільш поширений метод визначення вантажопідіймальної сили магнітних систем за певного робочого зазору і його відсутності здійснюється за допомогою розривної машини [3, 66]. Для визначення тягових характеристик зазор регулюється немагнітними прокладками, що вимагає додаткових витрат часу і володіє недостатньою точністю.

Нами запропоновано новий метод визначення тягових характеристик [17]. Рух магнітної системи за допомогою стержня забезпечує верхній захват розривної машини (рис. 4.1). Давач переміщення генерує аналоговий сигнал, пропорційний відстані між робочою поверхнею магнітної системи і зафіксованою плитою. Синхронно з реєстрацією сигналу давача переміщення реєструється сигнал тензодавача, встановленого на стержні кріплення магнітної системи до захвату розривної машини. Сигнали з давачів після нормуючих підсилювачів поступають на мікропроцесорний модуль аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) для попереднього опрацювання, реєстрації і накопичення вимірювальної інформації упродовж експерименту. Після закінчення експерименту дані з мікропроцесорного модуля передаються на ЕОМ та опрацьовуються з метою побудови тягових характеристик.



1 – захват верхній; 2 – магнітна система; 3 – випробувальна плита; 4 – захват нижній; 5 – давач переміщення з вбудованим нормуючим підсилювачем; 6, 8 – мікропроцесорний модуль АЦП; 7 – ЕОМ; 9 – нормуючий підсилювач; 10 – тензодавач

Рисунок 4.1 – Схема визначення тягових характеристик магнітних систем

Випробування проводилися на атестованій універсальній розривній машині УММ-20 (рис. 4.2) шляхом відриву розроблених магнітних систем від випробувальної плити шорсткістю $Ra=1,6$ мкм.

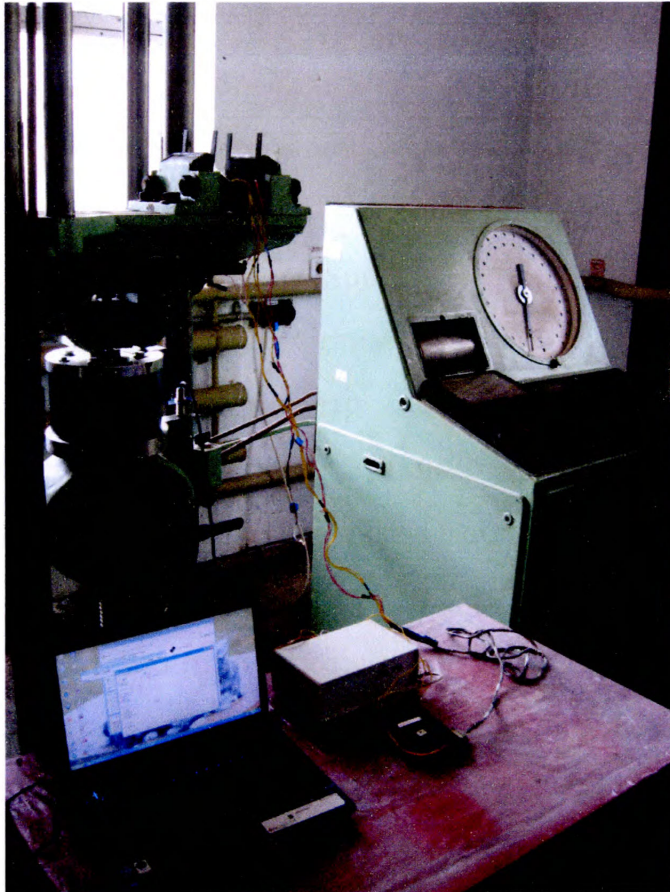


Рисунок 4.2 – Стенд для дослідження вантажопідіймальної сили

Експлуатаційні можливості магнітних ловильних пристроїв визначаються здатністю утримувати уловлені у свердловині феромагнітні предмети різної форми і маси. Тому, важливою характеристикою магнітних систем є питома підймальна сила на одиницю площі полюсів. Так як магнітне поле системи неоднорідне, то доцільно визначати значення питомої сили по всій робочій поверхні системи.

Нормативними документами ГОСТ 16528-87 "Плиты прямоугольные магнитные. Общие технические условия" і ГОСТ 17519-87 "Плиты прямоугольные электромагнитные. Общие технические условия" для магнітних і електромагнітних плит регламентований силовий параметр –

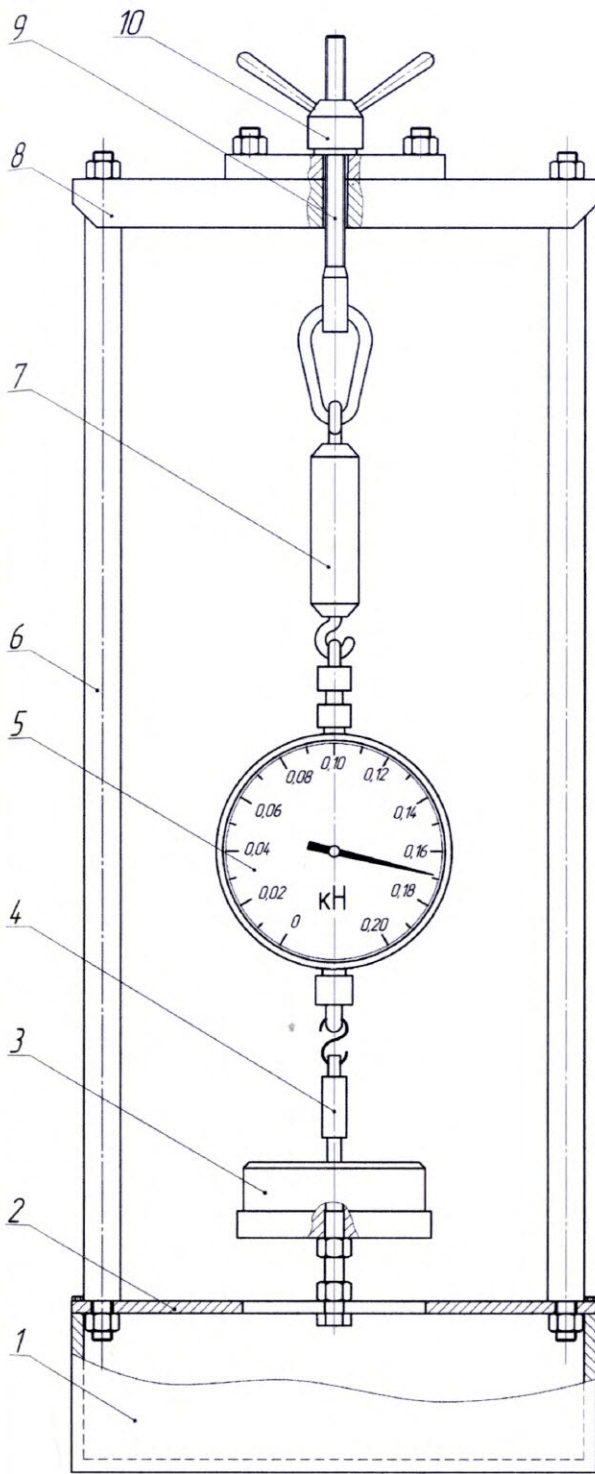
питома сила притягання і наведений метод її визначення. Даний метод придатний тільки для прямокутних систем, доволі трудомісткий для досліджень та не може бути використаний для магнітних систем пристроїв.

На кафедрі нафтогазового обладнання ІФНТУНГ розроблено стенд для визначення питомої вантажопідіймальної сили магнітних систем діаметром до 300 мм (рис. 4.3). Стенд складається з основи, нижньої плити з поздовжнім пазом та верхньої траверси, з'єднаних між собою вертикальними стійками. До траверси закріплена тяга, яка має можливість осьового переміщення шляхом повертання маховика. Тяга гнучкою ланкою з'єднана з вимірювальним приладом та дослідним зразком. Як прилад використано універсальний пружинний динамометр ДПУ-0,02-2 з межами вимірювання від 0,02 кН до 0,2 кН. Клас точності – 2, похибка вимірювання не перевищує ± 2 %. Дослідні зразки циліндричної або П-подібної форми виготовлені зі сталі 10. Площа робочої поверхні становить 1 см^2 , шорсткість $Ra=1,6 \text{ мкм}$.

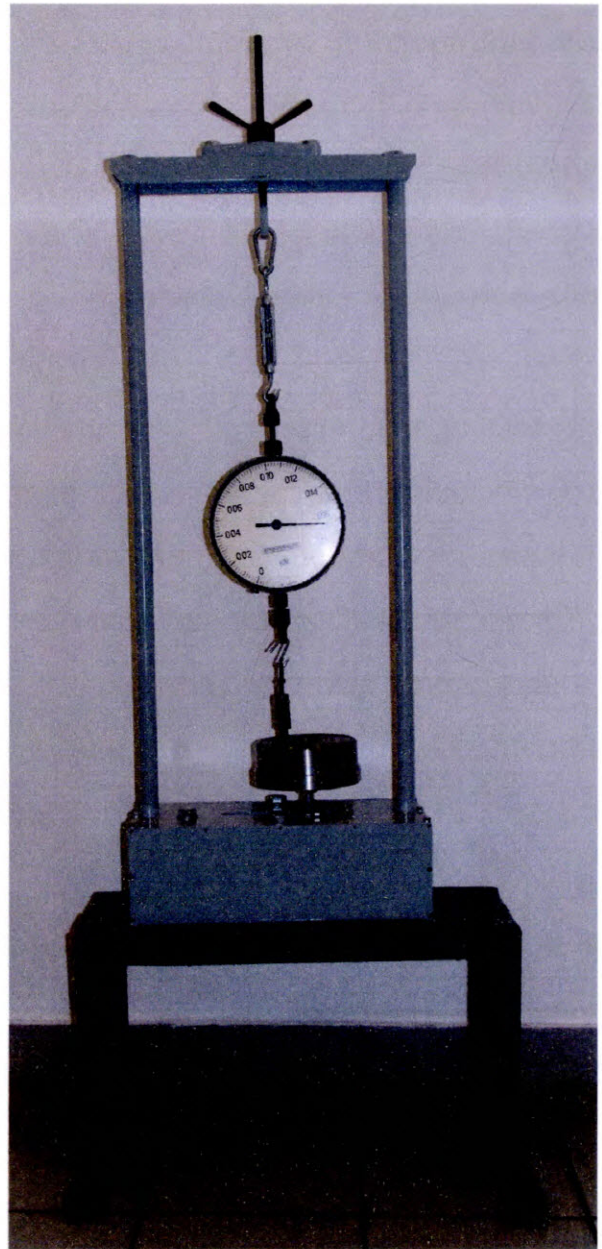
Магнітні системи, що підлягають випробуванням, кріпляться до плити з можливістю повертання відносно власної осі та осьового переміщення з метою забезпечення вертикального розміщення дослідного зразка у будь-якій точці робочої поверхні. До системи кріпиться кондуктор відповідного діаметра з отворами, які відповідають формі і розмірам дослідного зразка. Розміщення отворів і їх кількість визначається полюсним рисунком системи.

Випробування проводяться шляхом відриву дослідного зразка в напрямку, перпендикулярному до робочої поверхні системи. Питома сила визначається за показами динамометра в точках, розміщених на осьових та діагональних лініях магнітної системи. Кількість вимірювань та методика визначення середнього значення регламентовані ГОСТ 16528-87.

Розроблення принципово нових конструкцій фрезерів-уловлювачів з магнітним способом фіксування основної системи в будь-якому положенні ставить завдання з дослідження експлуатаційних характеристик допоміжної утримувальної системи.



а)



б)

а – схема стану; б – загальний вигляд

1 – основа; 2 – плита; 3 – магнітна система; 4 – дослідний зразок;
 5 – динамометр; 6 – стійка; 7 – гнучка тяга; 8 – траверса; 9 – тяга;
 10 – маховик

Рисунок 4.3 – Стенд для визначення питомої вантажопідіймальної сили

Під час ловильних робіт фрезерна коронка заглиблюється в породу, при цьому аварійний предмет, який контактує з основною магнітною системою, переміщує її в корпусі. Зусилля переміщення (зсуву) пропорційне силі притягання допоміжної системи до внутрішньої поверхні корпусу. Це зусилля не характеризує безпосередньо експлуатаційні можливості допоміжної системи на відміну від зусилля притягання, але з практичного боку є досить важливим у проектуванні системи. Тому, необхідно мати методи і засоби для визначення зусилля зсуву.

Промисловість не виготовляє стандартних приладів для визначення зусилля зсуву під час випробувань магнітних систем силових пристроїв [61]. Тому, нами розроблено методику і оснащення для проведення досліджень на базі розривної машини ИР 5040-5, призначеної для випробування зразків із різних матеріалів, у тому числі металів на розтягування, стискування і згинання (рис. 4.4) [104]. Максимальне навантаження – 5 кН, похибка вимірювань $\pm 1\%$, швидкість переміщення активного захвату від 0,2 мм/хв до 200 мм/хв.

Магнітну систему (основну і допоміжну, так як вони жорстко з'єднані між собою) фрезера-уловлювача діаметром 112 мм приєднують до верхнього активного захвата за допомогою гнучкої ланки. До нижньої траверси через немагнітний диск кріплять циліндр, внутрішній діаметр та матеріал (сталь 45) якого відповідають корпусу фрезера-уловлювача ФУМ-112. Циліндр на третину заповнюють промивальною рідиною густиною 1160 кг/м³. Усередині циліндра розміщують магнітну систему так, щоб основна система контактувала з немагнітним диском, тоді допоміжна система притягується до стінок циліндра. Так як зусилля притягання залежить від зазору між трубою і магнітопроводами, то для забезпечення технологічності шорсткість кожної контактуючої поверхні становить 3,2 мкм.

Випробування проводилися за швидкості переміщення магнітної системи 50 мм/хв. Результати вимірювання зусилля переміщення магнітної системи реєструвалися тензорезисторним вимірювачем сили.

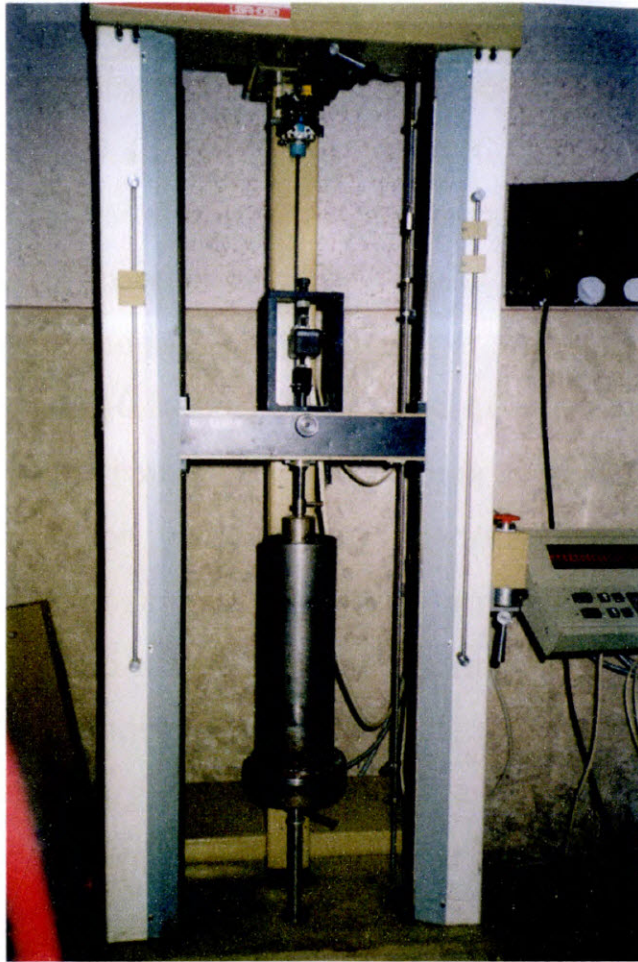


Рисунок 4.4 – Стенд для визначення зусилля зсуву

Дослідження впливу експлуатаційних чинників (температури, промивальної рідини, вібрації та ударів) на силові і магнітні характеристики розроблених пристроїв не проводилися, так як ці питання ґрунтовно розглянуті в роботах Курнікова Ю. О., Кобилянського М. Т., Кокоріна О. Є. [3, 65, 105]. Враховуючи, що природа магнетизму однакова для постійних литих, феритових і рідкісноземельних магнітів, що використовуються у системах ловильних пристроїв, то результати проведених раніше досліджень з великим ступенем достовірності можна використати для розроблених систем.

Промивальна рідина необважнена та обважнена баритом практично не впливає на силові характеристики систем, так як її магнітна проникність з достатньою для практичних цілей точністю може бути прийнята рівною одиниці [61]. Обважнена феромагнітними наповнювачами (гематит) рідина на 7-10 % збільшує зусилля притягання феромагнітних предметів у робочому

зазорі [3].

Рідкісноземельні неодимові магніти стійкі до дії вібраційний навантажень частотою до 5000 Гц за амплітуди не більше 10 мм, багаторазових ударних навантажень з максимальним прискоренням до 1400 м/с^2 та одиночних ударів з прискоренням до 14710 м/с^2 [7]. Враховуючи, що частота коливань бурильної колони змінюється від 3 Гц до 600 Гц, а амплітуда поздовжніх коливань від 0,2 мм до 25 мм [106, 107], можна вважати, що запас стійкості до вібраційних навантажень магнітних систем є достатнім.

Вплив температури на магнітні властивості систем визначається здебільшого термостабільністю постійних магнітів, у нашому випадку – складу Nd-Fe-B. Залежно від масового співвідношення хімічних елементів у складі неодимових магнітів відбувається незворотна часткова втрата їх властивостей за температур, вищих робочої магнітів. Зворотні процеси, що викликані частковим зменшенням магнітних характеристик, визначаються температурним коефіцієнтом. Теоретичні дослідження термостабільності розроблених магнітних систем наведено в розділі 3.

Після експериментальних досліджень магнітних систем, пристрої пройшли випробування в умовах експлуатації (розділ 5).

4.2 Дослідження розподілу магнітної індукції на робочих поверхнях магнітних систем

Дослідження проводилися з метою визначення нерівномірності розподілу магнітної індукції на робочій поверхні систем та встановлення зон з найбільшою густиною магнітного поля, що важливо для визначення розміщення уловлюваних предметів і можливості перекриття промивального отвору металевими уламками, а також для порівняння розподілу магнітної індукції на поверхні ідентичних систем на різних типах магнітів.

Характер розподілу магнітної індукції на поверхні системи діаметром 225 мм по лініях А-А та Б-Б (рис. 4.5, г) зображено на рис. 4.6. Як бачимо на

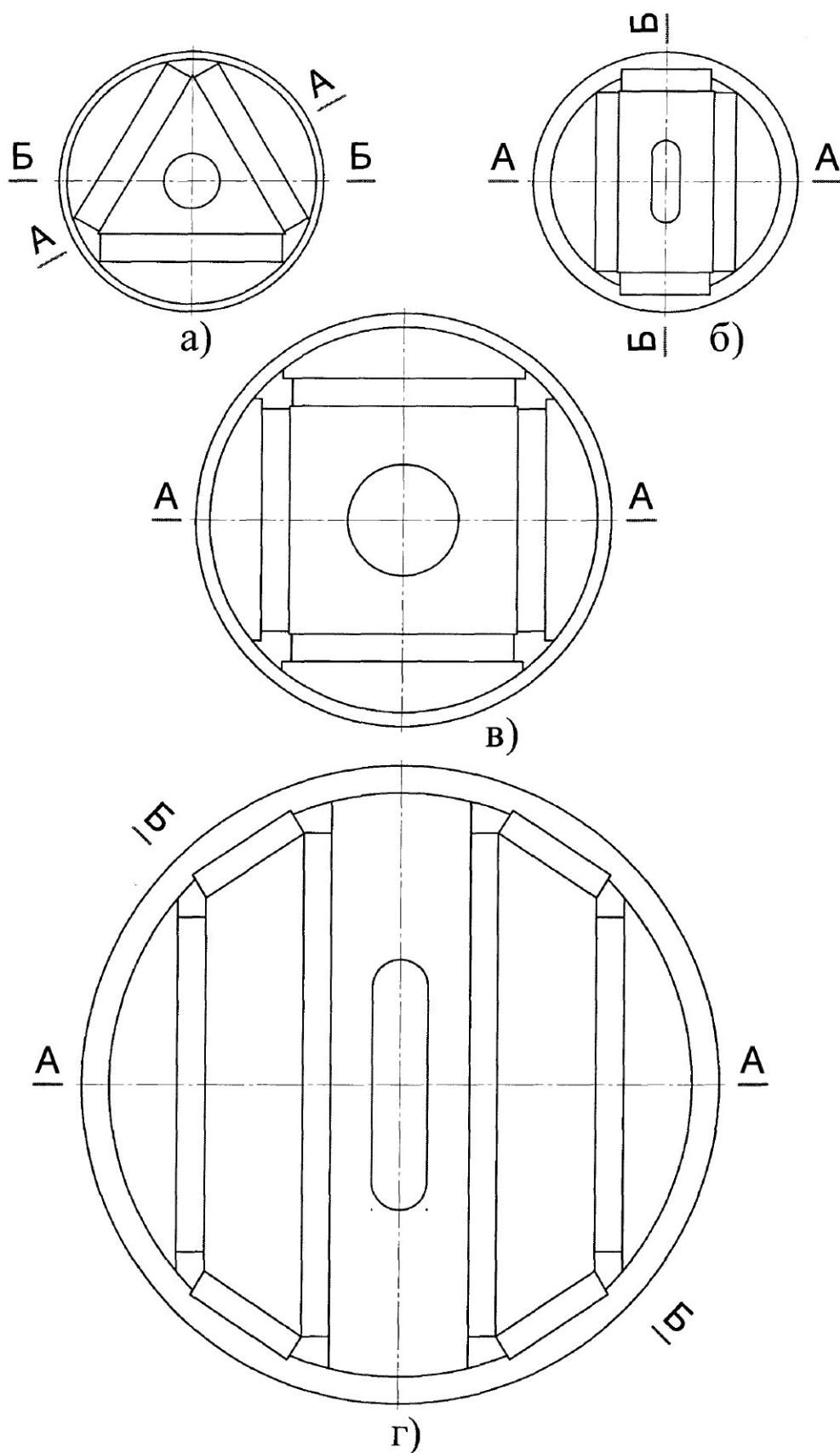


Рисунок 4.5 – Схеми вимірювання індукції магнітних систем діаметрами
95 мм (а, б), 150 мм (в), 225 мм (г)

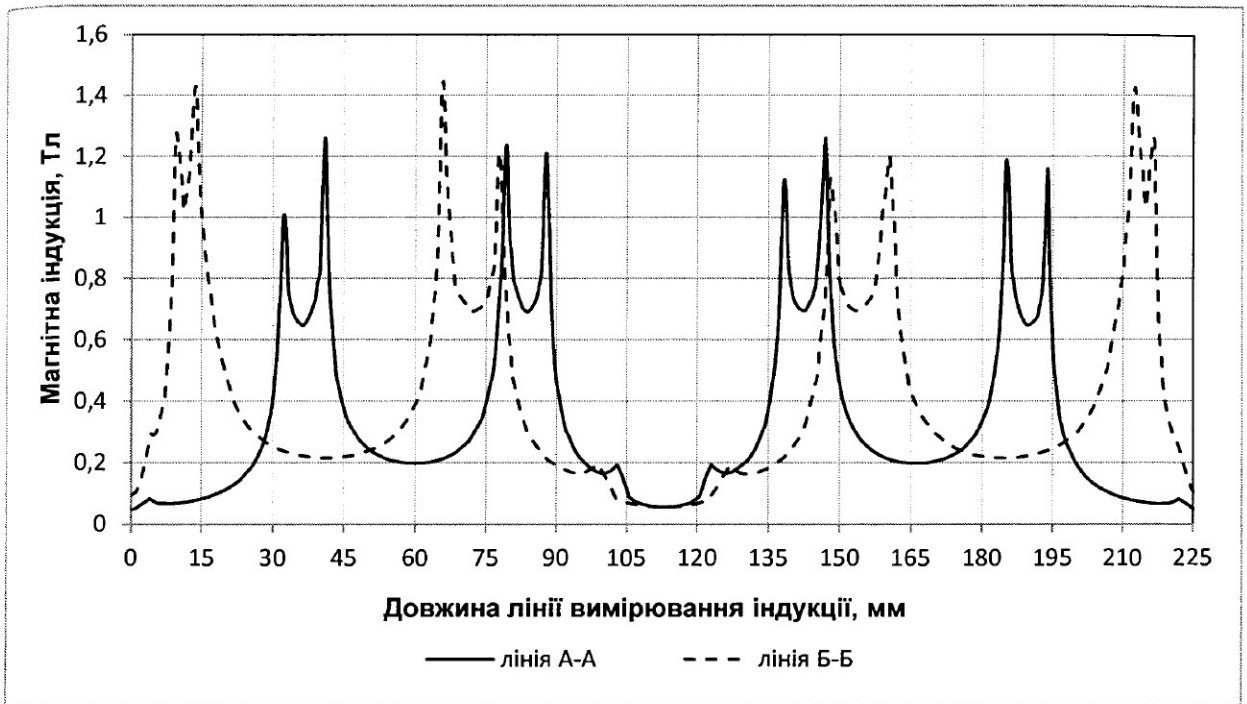


Рисунок 4.6 – Характер розподілу магнітної індукції на робочій поверхні системи діаметром 225 мм

графіку, система володіє осьовою симетрією і близька до класу магнітних періодичних фокусувальних систем. Це пояснюється наявністю періодичних піків, симетричних відносно осі магнітної системи. Максимуми магнітної індукції спостерігаються на ребрах і вершинах магнітопроводів, що пояснюється найбільшою густиною силових ліній в цих зонах, так як вказані елементи є концентраторами магнітного потоку. Окрім того, спостерігаємо скачки значень індукції в безпосередній близькості до промивального отвору (103 мм і 123 мм по довжині лінії А-А). Це пояснюється так званим краєвим ефектом [87], тобто зміною величини індукції на межі двох середовищ з суттєво різною магнітною проникністю (в даному випадку сталь-повітря).

Аналогічний рисунок магнітної індукції спостерігається на робочій поверхні системи діаметром 150 мм (рис. 4.5, в), яка характеризується зменшеною кількістю пар полюсів і конструкцією центрального магнітопроводу у вигляді прямокутної призми (рис. 4.7). Нерівномірний розподіл магнітного поля на робочій поверхні системи буде призводити до

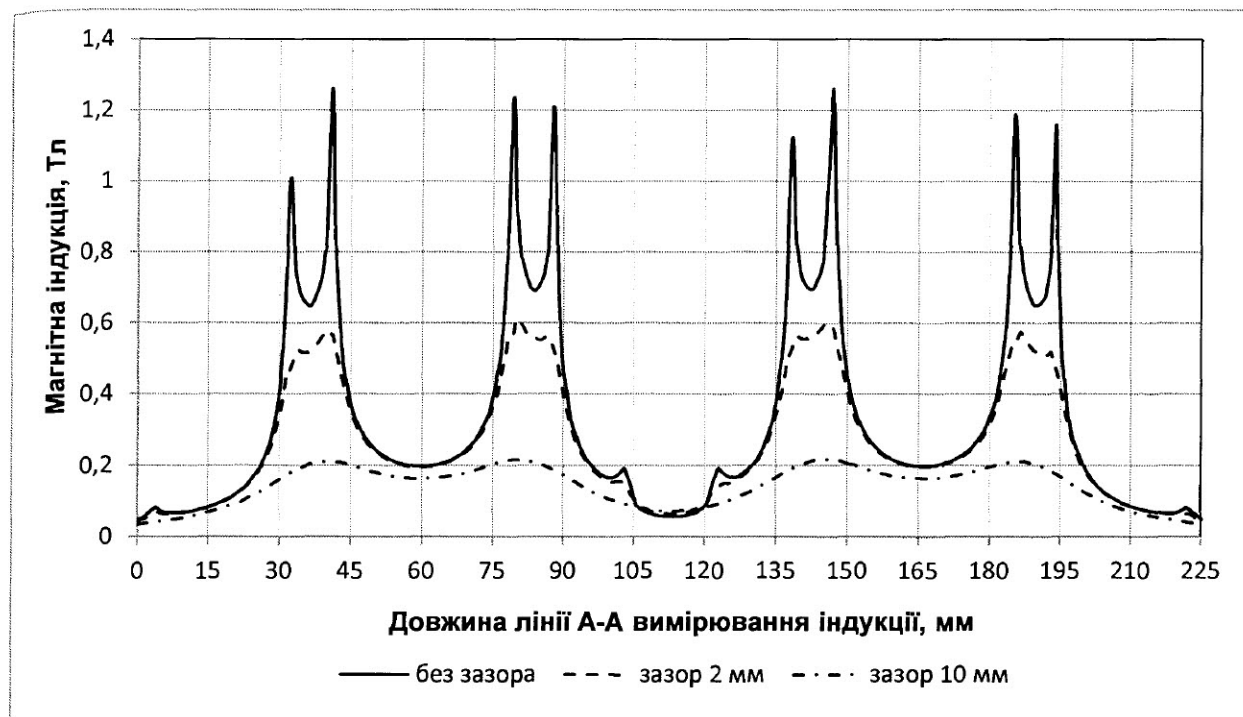


Рисунок 4.7 – Характер розподілу магнітної індукції в робочих зазорах системи діаметром 225 мм

зміщення уловлюваних предметів до ділянок з максимальною густиною магнітних силових ліній, залишаючи вільним промивальний отвір.

Дослідженнями [3] встановлено, що ступінь досконалості конструкцій магнітних систем прямо пропорційний наявності і величині ділянок з високою густиною магнітного потоку, тобто кількості магнітопроводів. Система діаметром 225 мм з магнітопроводами у формі пластин та сегментів має більш рівномірний розподіл індукції, так як збільшена кількість ділянок з максимальними значеннями (до 1,2 Тл). Тому багатополюсні системи є ефективнішими за системи з одним центральним магнітопроводом.

У процесі експлуатації магнітних ловильних пристроїв не завжди вдається досягти безпосереднього контакту робочої поверхні системи з уловлюваними предметами, тобто між ними існує певний робочий зазор. Так як силові характеристики систем прямо пропорційні квадрату індукції, то виникає необхідність у дослідженні характеру її зміни залежно від величини зазору.

Як бачимо на графіках (рис. 4.7, 4.8) криві індукції магнітних систем діаметром 225 мм і 150 мм за зазору 2 мм мають пологий характер, а пікові значення в 2-3 рази нижчі за максимальні. За зазору 10 мм спостерігається практично рівномірний розподіл індукції з доволі низькими значеннями 0,1-0,2 Тл по всій робочій поверхні. Різде падіння магнітної індукції зі збільшенням робочого зазору свідчить про те, що розглянуті системи відносяться до класу утримувальних.

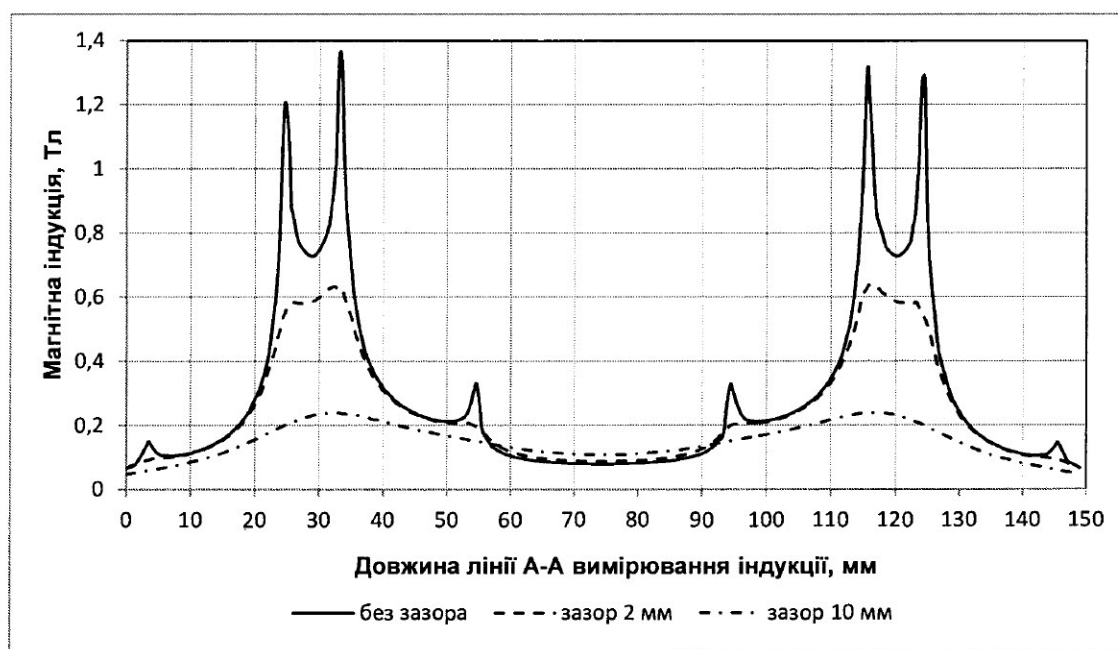


Рисунок 4.8 – Характер розподілу магнітної індукції в робочих зазорах системи діаметром 150 мм

Досліджено також розподіл магнітної індукції на робочих поверхнях систем діаметром 95 мм з трикутним (рис. 4.5, а) і прямокутним (рис. 4.5, б) центральним магнітопроводом (рис. 4.9, 4.10). Трикутна система володіє максимальними значеннями індукції у вершинах центрального магнітопроводу, де спостерігається звуження полюсів. З віддаленням від вершин крива індукції різко спадає, що призводить до виникнення ділянок з низькою густиною магнітного потоку. Подібні результати вимірювання магнітної індукції на робочій поверхні прямокутної системи. Наявність допоміжних магнітів на бокових гранях центрального магнітопроводу

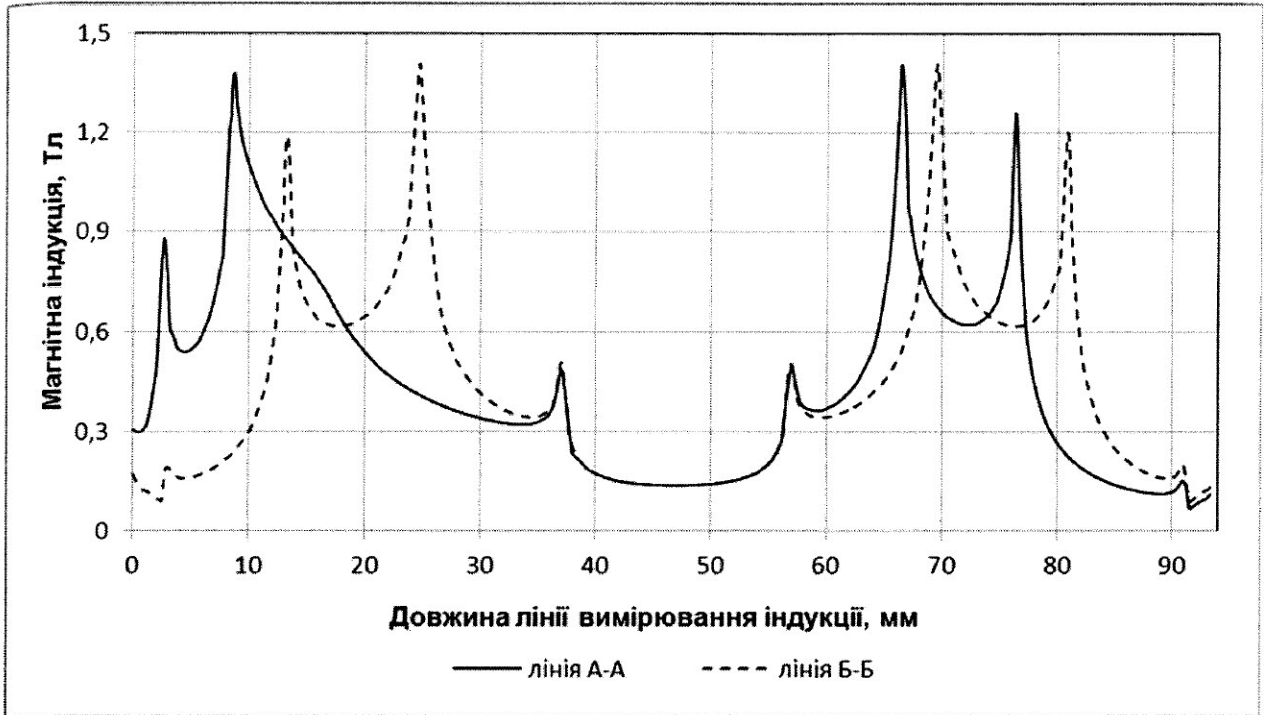


Рисунок 4.9 – Характер розподілу магнітної індукції на робочій поверхні системи з трикутним центральним магнітопроводом

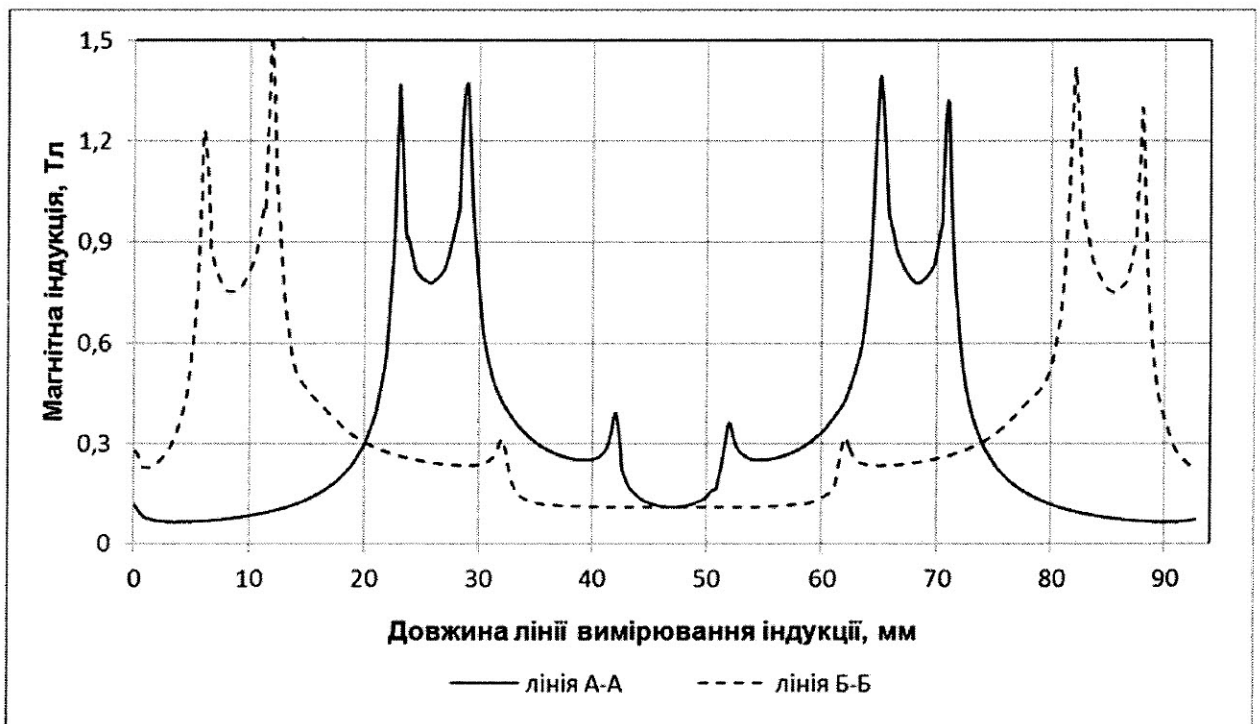


Рисунок 4.10 – Характер розподілу магнітної індукції на робочій поверхні системи з прямокутним центральним магнітопроводом

дає можливість одержати рівномірніший розподіл індукції, у тому числі і в безпосередній близькості до промивального отвору.

Недоліками даних систем є низькі значення індукції на сегментних магнітопроводах.

Відомо, що матеріал постійних магнітів та геометричні співвідношення елементів систем суттєво впливають на їх магнітні характеристики. На рисунках 4.11 та 4.12 зображено криві, одержані в результаті безпосереднього замірювання магнітної індукції на робочих поверхнях магнітних систем, складених на основі постійних рідкісноземельних та феритових магнітів. Максимальні значення магнітної індукції на робочій поверхні систем діаметром 95 мм та 150 мм з неодимовими магнітами марки N42SH становлять відповідно 1,4 Тл та 1,36 Тл. Ці ж показники для систем з феритовими магнітами марки 24БА210 досягають значень 0,53 Тл та 0,43 Тл відповідно. Хоч характер розподілу магнітної індукції залишається незмінним, середнє значення індукції по довжині лінії в 3-3,5 рази вище у випадку використання рідкісноземельних магнітів. Порівняльний аналіз кривих індукції, одержаних у різних робочих зазорах (рис. 4.8, 4.12) показує, що навіть за зазору 2 мм максимальні значення індукції систем на неодимових магнітах (0,64 Тл) більші від систем на феритових магнітах (0,43 Тл). За зазору 10 мм індукція зменшується до 0,24 Тл, проте середнє значення – 0,15 Тл майже в 2 рази вище від феритових систем.

Таким чином, дослідженнями встановлено характер розподілу магнітної індукції на поверхні магнітних систем та в робочому зазорі. Використання в системах рідкісноземельних постійних магнітів дає можливість одержати приблизно в 3 рази вищі значення індукції, ніж із використанням феритових магнітів. За середніми значеннями індукції системи із феритовими магнітами наближаються до систем із неодимовими магнітами за робочого зазору більше 10 мм.

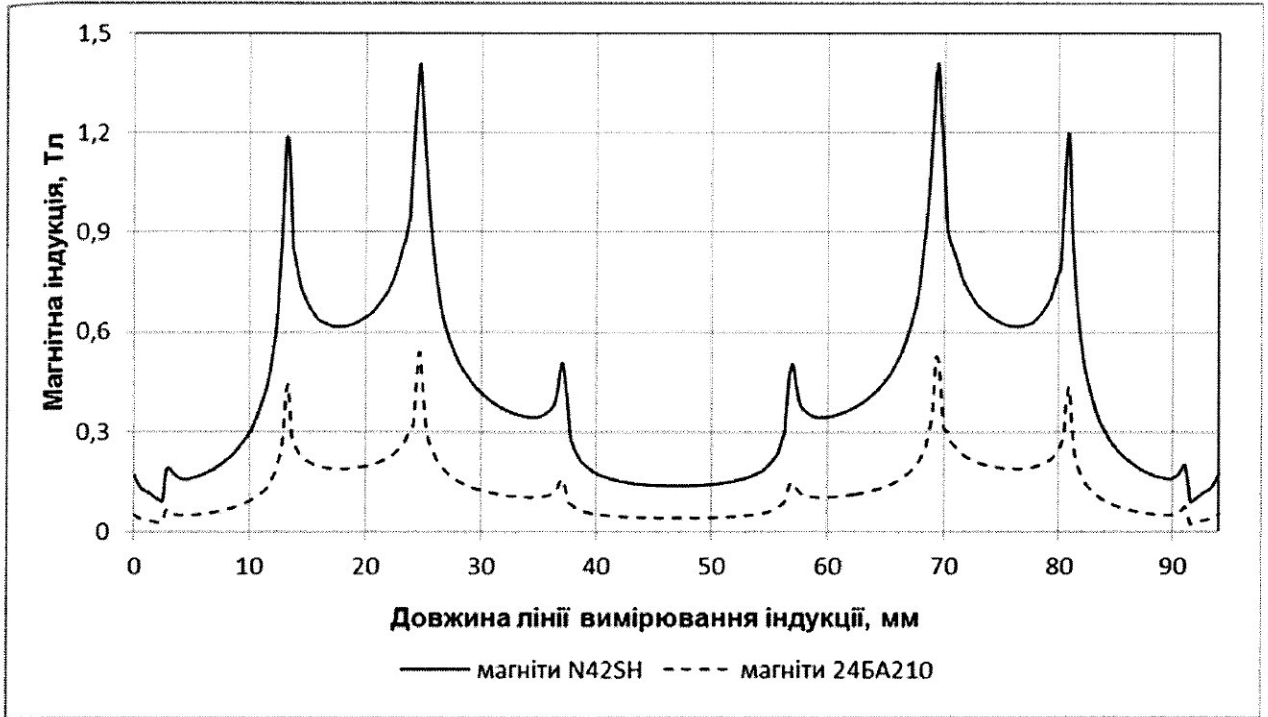


Рисунок 4.11 – Характер розподілу магнітної індукції на робочій поверхні систем з трикутним центральним магнітопроводом

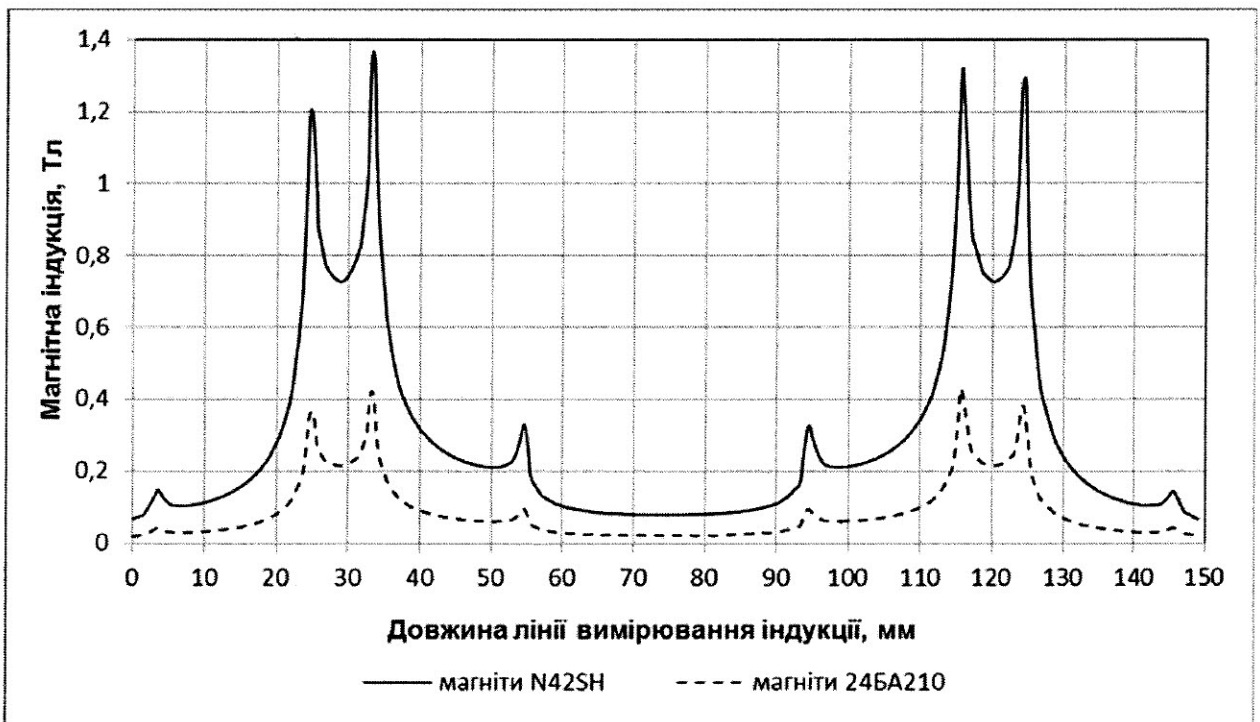


Рисунок 4.12 – Характер розподілу магнітної індукції на робочій поверхні систем з прямокутним центральним магнітопроводом

4.3 Визначення тягових характеристик систем ловильних пристроїв

Основною експлуатаційною характеристикою магнітних систем ловильних пристроїв є тягова – залежність вантажопідіймальної сили від величини робочого зазору, на яку суттєво впливають конструктивні особливості систем та матеріал постійних магнітів і магнітопроводів.

Тягові характеристик розроблених магнітних систем визначалися за методикою, вказаною в п. 4.1. Випробування проводилися на розривних машинах шляхом відриву систем від плит, виготовлених зі сталі 10, діаметр яких відповідав діаметрові магнітної системи, а товщина була не менша міжполюсної відстані.

На рис. 4.13 зображено тягові характеристики пристроїв ПМЛ-115, ПМЛ-118 та ПМЛ-146. Аналіз одержаних залежностей дає підстави стверджувати, що всі криві мають подібний характер – різке зниження вантажопідіймальної сили зі збільшенням робочого зазору. Це пояснюється тим, що магнітні системи пристроїв ПМЛ належать до броньового типу, тобто працюють як на уловлення, так і на утримання феромагнітних предметів. Максимальне значення вантажопідіймальної сили збільшується зі збільшенням зовнішнього діаметра пристрою, адже зростає площа робочої поверхні магнітопроводів. Стрімке зниження сили в системі пристрою ПМЛ-118 зумовлене використанням магнітів меншої довжини. Проте, це не вплинуло на максимальне значення сили, яке дещо вище від значення системи пристрою ПМЛ-115 при тому, що розміри систем однакові.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень з визначення оптимальної висоти магнітної системи були виготовлені три зразки систем діаметром 150 мм та висотою 40 мм, 70 мм і 110 мм (рис. 4.14). У результаті експериментів одержано криві (рис. 4.15), що засвідчують загальну тенденцію: зі збільшенням висоти системи зростає вантажопідіймальна сила, а тягова характеристика стає пологішою. Проте, збільшення висоти системи

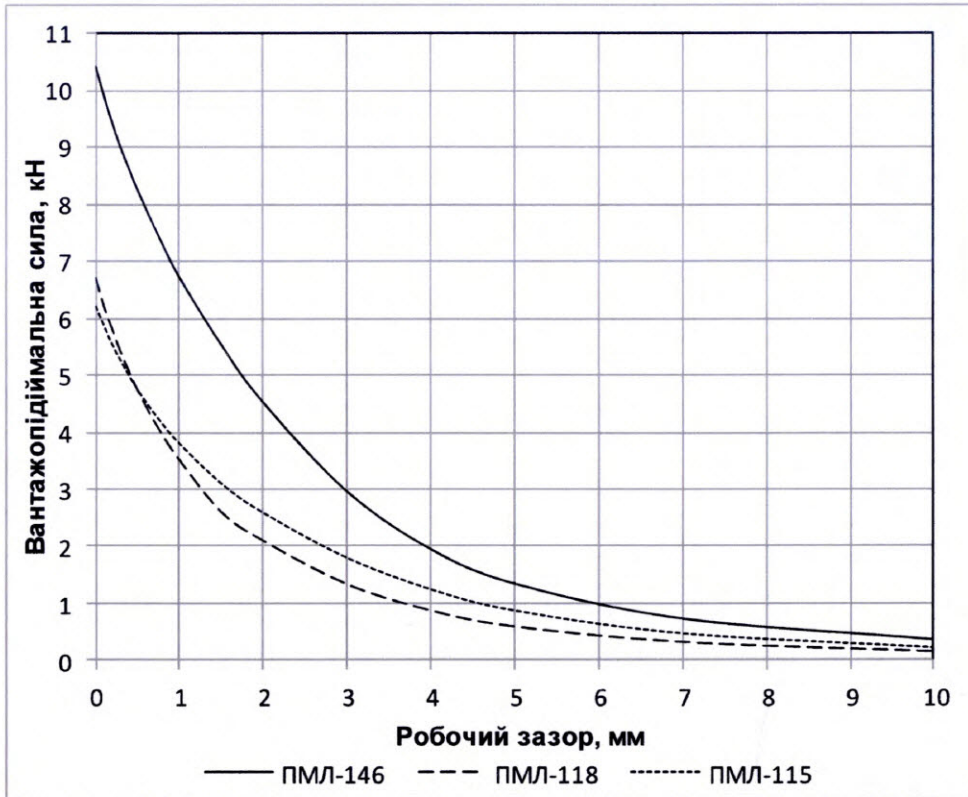


Рисунок 4.13 – Тягові характеристики магнітних систем пристроїв ПМЛ-115, ПМЛ-118 та ПМЛ-138



Рисунок 4.14 – Магнітні системи пристрою ПМЛ-195

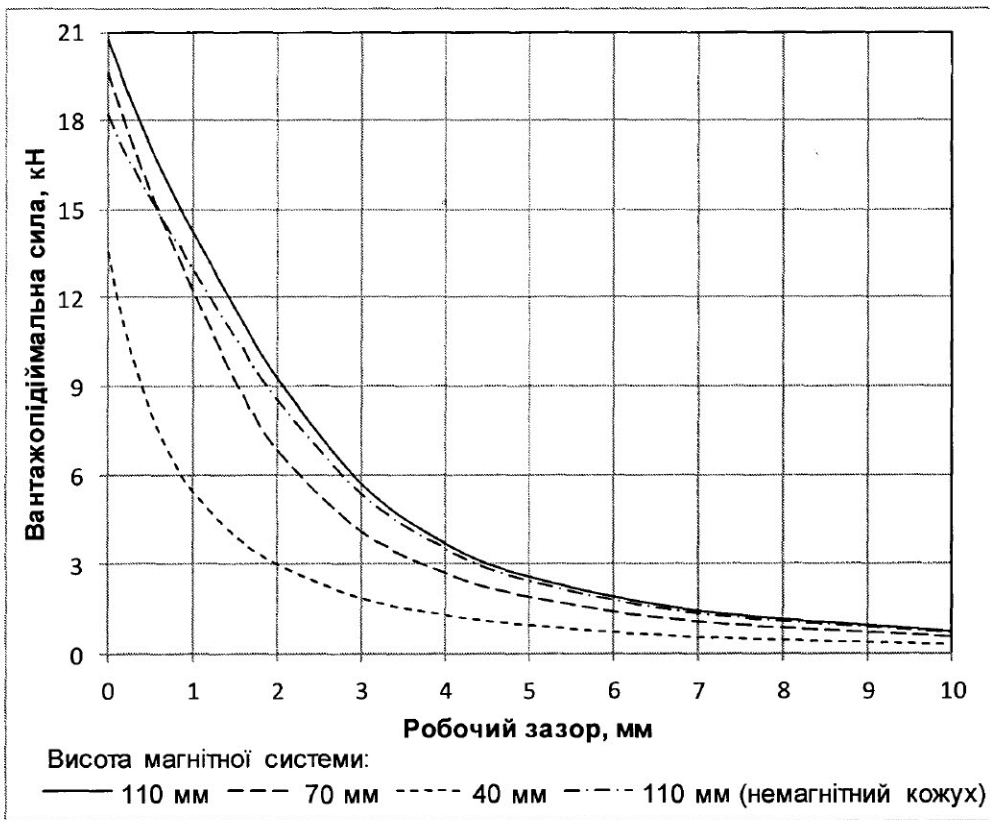


Рисунок 4.15 – Тягові характеристики пристрою ПМЛ-195 за різної висоти магнітних систем

понад 70 мм не зумовлює суттєвого приросту сили, так як за цієї висоти відбувається насичення магнітопроводів (розділ 2). На основі аналізу результатів проведених досліджень встановлено, що магнітні системи діаметром 150 мм висотою від 70 мм до 80 мм є раціональними за умови використання енергії магнітного поля, а також економії матеріалів.

Для дослідження впливу матеріалу обійми на тягові характеристики до системи пристрою ПМЛ-195 по чергово приєднували магнітну (сталь 10) та немагнітну (алюміній) обійми. Як бачимо на рис. 4.15, використання обійми із немагнітного матеріалу призводить до зменшення сили відриву за малих зазорів на 12 %. Зі збільшенням робочого зазору криві практично співпадають. Це пояснюється тим, що феромагнітна обійма виконує роль магнітопроводу, чим збільшує корисну площу полюсів. Враховуючи, що немагнітні матеріали дорожчі за звичайні конструкційні сталі і володіють нижчими міцнісними характеристиками, використовувати їх як матеріал обійми недоцільно.

Аналіз результатів теоретичних і експериментальних досліджень тягових характеристик розроблених магнітних систем пристроїв діаметром від 88 мм до 270 мм показав, що відмінність між ними складає 6-8 % (табл. 4.1). Це свідчить про коректність методу розрахунку систем та правильний вибір методики проведення експерименту. Найбільша похибка спостерігається за "нульових" зазорів (рис 4.16), де виникають великі градієнти магнітного поля на межі двох середовищ.

Таблиця 4.1 – Параметри магнітних систем пристроїв ПМЛ та ФУМ

Показник	Діаметр ловильного пристрою, мм									
	88	103	112	115	118	136	146	195	270	
Умовна вантажопі- діймальна сила F, кН:										
розрахункова	4,1	5,1	6,5	6,7	7,2	10,3	11,1	20,4	44,2	
експериментальна	3,8	4,7	6,0	6,2	6,7	9,8	10,4	19,6	42,3	

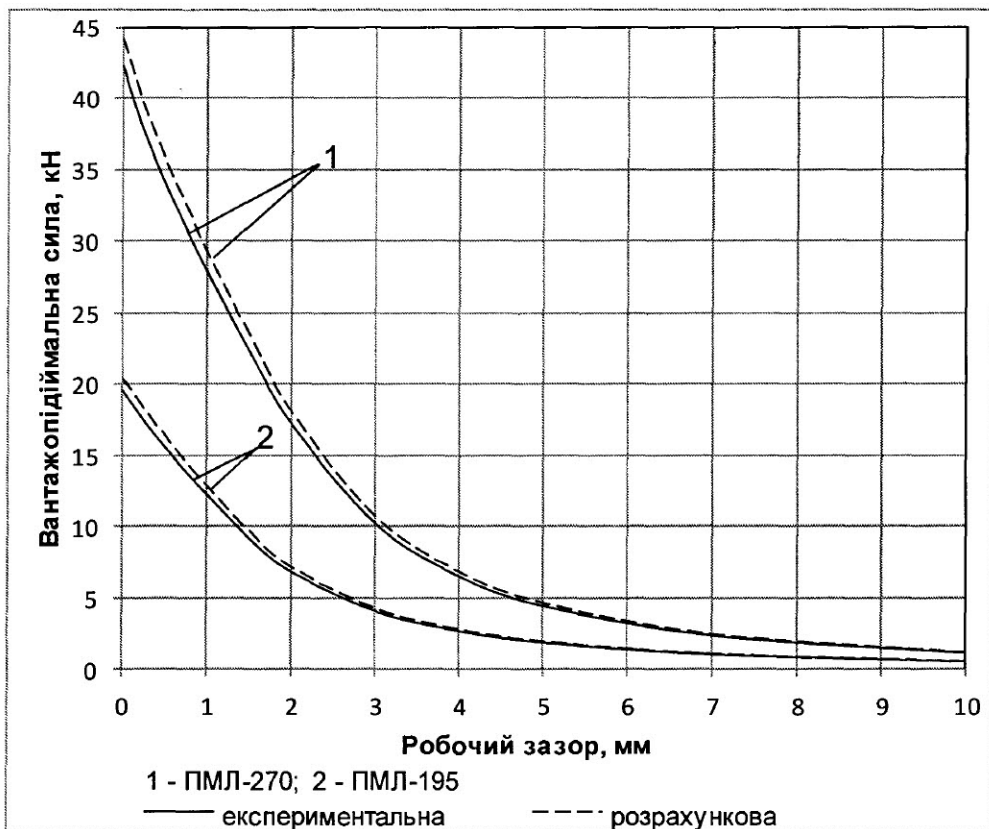


Рисунок 4.16 – Тягові характеристики магнітних систем пристроїв ПМЛ-195 та ПМЛ-270

Під час експлуатації ловильних пристроїв необхідно забезпечити безпосередній контакт аварійних предметів із робочою поверхнею системи. Так як форма, маса і матеріал уловлюваних у свердловині предметів досить різноманітні, то доцільно визначити питому підймальну силу. Результати відриву від робочих поверхонь магнітних систем різної висоти діаметром 150 мм дослідного зразка зі сталі 10 з площею контакту 1 см^2 зображені на рис. 4.17. Як бачимо, максимальні значення питомої сили – $1,8-2,0 \text{ Н/мм}^2$ відповідають точкам 2 та 6, що знаходяться на грані та вершині центрального магнітопроводу, адже саме тут найбільша густина магнітних силових ліній на поверхні системи. Віддаляючись від зон максимальних значень індукції питома сила зменшується до $1,4-1,6 \text{ Н/мм}^2$. Аналогічно з умовною вантажопідйальною силою, питома сила також зростає на 7-15 % зі збільшенням висоти системи і набуває максимального значення на висоті 110 мм.

На вибої свердловин найчастіше залишаються елементи бурильної колони, породоруйнівного, ріжучого та ловильного інструменту. Для їх виготовлення застосовуються якісні конструкційні та леговані сталі 45, 36Г2С, 40Х, 40ХН, долотні сталі 14ХНЗМА, 18ХНЗМА, твердий сплав.

Для дослідження впливу матеріалу предметів на силові характеристики системи були виготовлені дослідні зразки зі сталі 10, 36Г2С та долотної сталі 14ХНЗМА. Під час випробувань спостерігалось зменшення питомої вантажопідйальної сили під час відриву зразків зі сталі 36Г2С та 14ХНЗМА відповідно на 9-10 % та 20-22% (рис. 4.18) порівняно зі зразком із сталі 10. Найбільші значення питомої сили для системи діаметром 225 мм зосереджені на ділянках з максимальною магнітною індукцією, тобто на вершинах і ребрах магнітопроводів.

Вольфрамо-кобальтовий твердий сплав слабо володіє феромагнітними властивостями [108]. Раніше проведеними дослідженнями [3] встановлено можливість вилучення твердосплавних предметів із свердловини. При цьому зусилля притягання становить 15-20 % порівняно із матеріалом сталь 10.

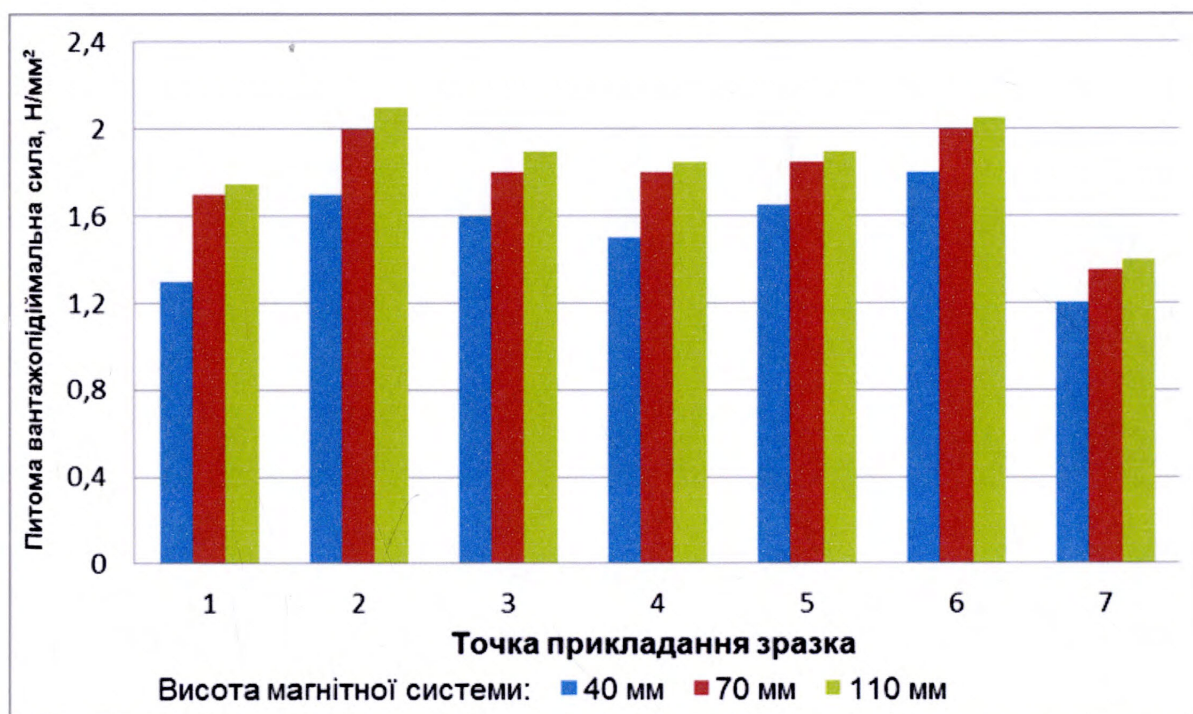
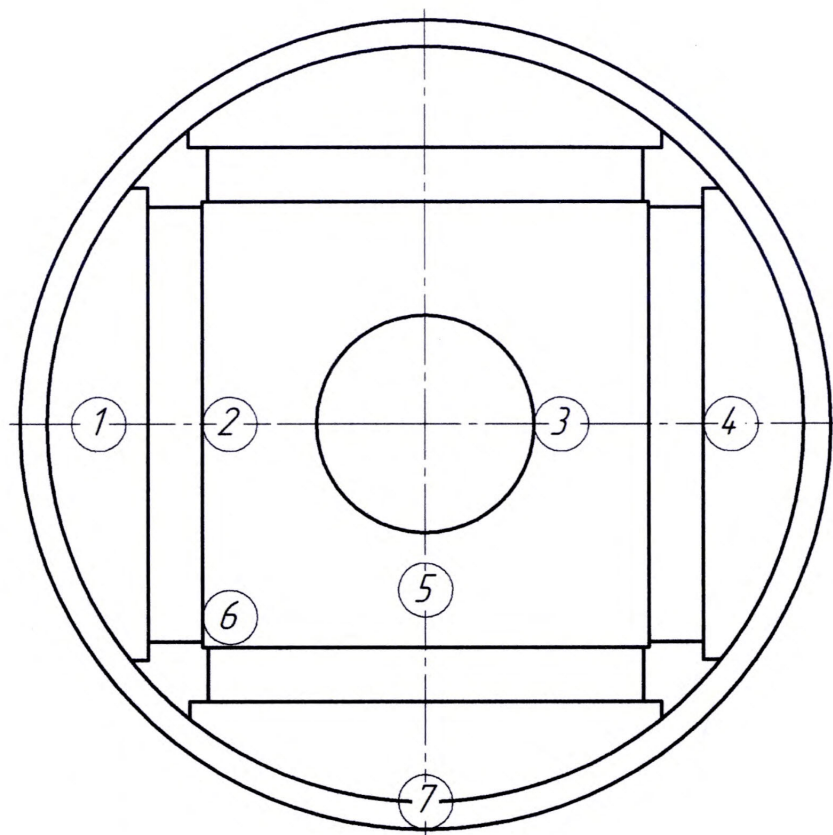


Рисунок 4.17 – Питома вантажопідіймальна сила системи діаметром 150 мм

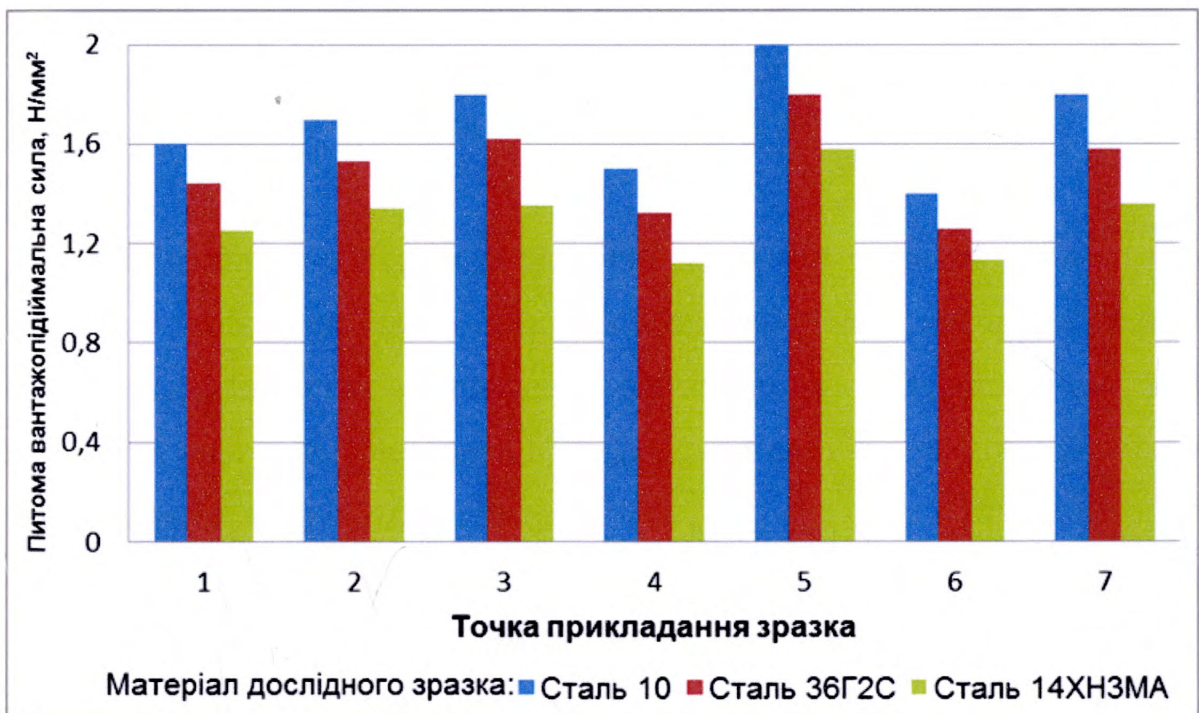
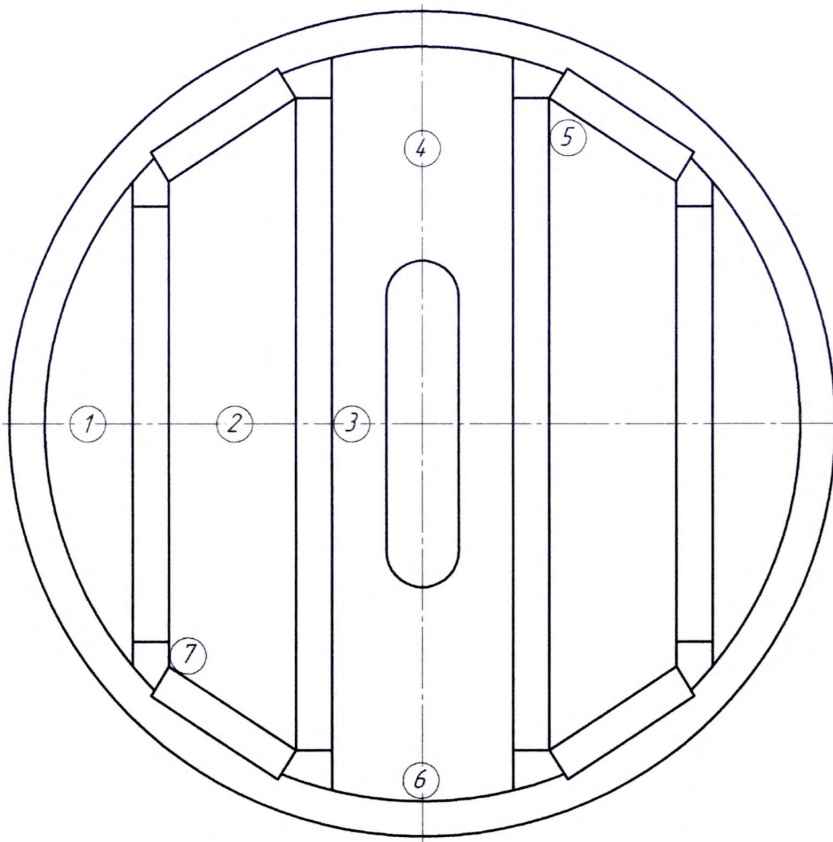


Рисунок 4.18 – Питома вантажопідіймальна сила залежно від матеріалу дослідного взірця

За результатами стендових випробувань визначені зусилля, які необхідно прикласти для переміщення магнітних систем фрезерів-уловлювачів, а саме: 720 Н для ФУМ-112, 910 Н для ФУМ-136. Варто зазначити, що значення одержані для конкретних конструкцій допоміжних систем, які містять один магніт складу неодим-залізо-бор і два магнітопроводи кільцевої форми з раціональними співвідношеннями геометричних розмірів, визначених на основі теоретичних досліджень (розділ 3). Вищих значень зусилля переміщення можна досягнути шляхом збільшення висоти магнітної системи (кількості магнітів та магнітопроводів).

Таким чином, встановлено максимальні значення умовної вантажопідіймальної сили пристроїв ПМЛ та ФУМ, а також їх тягові характеристики. Результати випробувань розроблених ловильних пристроїв підтверджують можливість вилучення шарошок, лап, елементів опор та озброєння доліт, у тому числі і твердосплавного, та інших предметів, що слабо володіють феромагнітними властивостями.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено лабораторний стенд для визначення питомих силових показників магнітних систем та запропоновано новий метод дослідження тягових характеристик ловильних пристроїв з використанням ЕОМ. Розроблена програма і методика досліджень та вибране технічне оснащення забезпечили достовірність результатів.

2. Експериментальні дослідження силових і магнітних характеристик розроблених ловильних пристроїв підтвердили результати теоретичних розрахунків (розбіжність не перевищує 15%) та коректність запропонованого методу розрахунку магнітних систем.

3. Визначено характер розподілу магнітної індукції на робочих поверхнях систем різних конструкцій, що дало можливість оцінити їх досконалість з точки зору рівномірності насичення магнітопроводів. Системи

на рідкісноземельних магнітах володіють у 2-3 рази вищою індукцією, ніж аналогічні на ферито-барієвих магнітах.

4. Визначено тягові характеристики, на основі яких встановлені раціональні геометричні розміри систем за умови ефективного використання енергії магнітного поля. Одержані високі значення вантажопідіймальної сили пристроїв дають можливість зарахувати їх до класу утримувальних.

5. Експериментально досліджено вплив матеріалу уловлюваного предмету на зусилля притягання до системи. Визначено ділянки з максимальними значеннями питомої вантажопідіймальної сили та встановлено нерівномірність її розподілу на робочих поверхнях систем, що вперше дає можливість оцінити можливість вилучення металевих предметів із свердловини залежно від їх розміщення.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ТА ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ МАГНІТНИХ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

5.1 Розроблення магнітних пристроїв типу ПМЛ

Відсутність в Україні серійного виробництва магнітних ловильних пристроїв і низькі характеристики зарубіжних аналогів зумовлює необхідність розроблення пристроїв нового покоління.

За замовленням бурових і нафтогазовидобувних підприємств в ІФНТУНГ розроблено пристрої магнітні ловильні (ПМЛ) із зовнішніми діаметрами 88 мм, 103 мм, 115 мм, 118 мм, 146 мм, 195 мм та 270 мм. В основу створення пристроїв ПМЛ покладено магнітні системи броньового типу. Як магнітотверді матеріали використано рідкісноземельні магніти складу неодим-залізо-бор. Полісний рисунок систем – схема розміщення магнітів і магнітопроводів, визначений шляхом комп'ютерного моделювання для кожного типорозміру ловильного пристрою. Зовнішні діаметри пристроїв встановлено виходячи із конструкції свердловини, стану стовбура свердловини (обсаджений, не обсаджений), умов забезпечення мінімальних гідравлічних втрат промивальної рідини і рекомендованих швидкостей висхідного потоку у затрубному просторі, а також на основі рекомендацій з вибору раціональних геометричних розмірів магнітних уловлювачів [62, 109] та досвіду їх експлуатації.

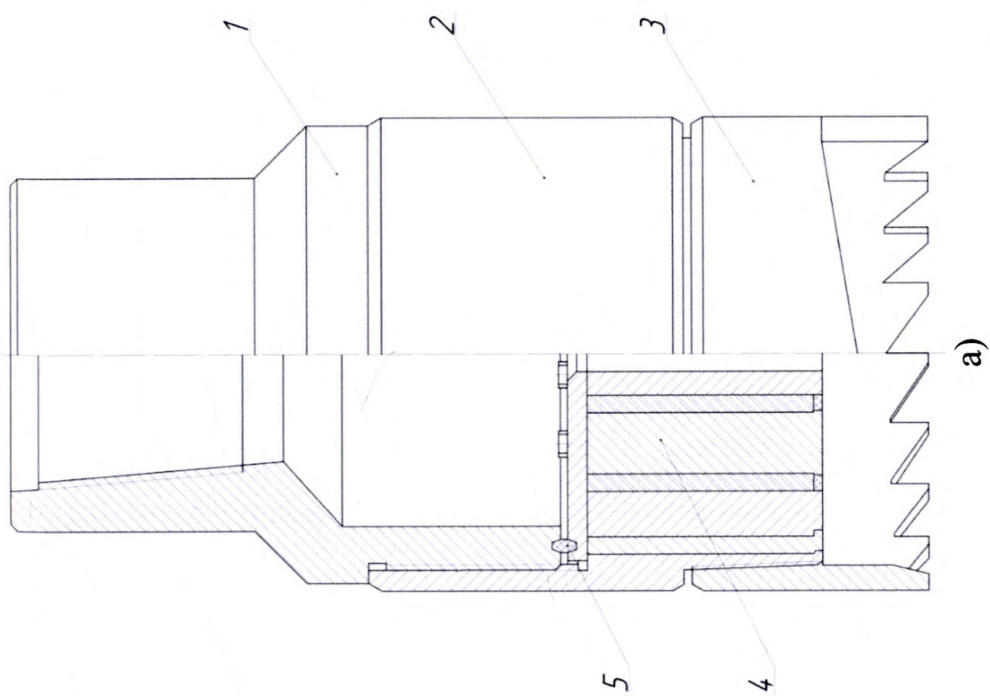
У пристроях діаметрами від 88 мм до 195 мм використано системи з одним центральним магнітопроводом у вигляді прямої призми: трикутної – ПМЛ-88, ПМЛ-103, ПМЛ-115, прямокутної – ПМЛ-118, ПМЛ-146, ПМЛ-195.

Для свердловин умовним діаметром від 295 мм до 320 мм вперше розроблено пристрій ПМЛ-270 із багатополісною системою [9].

Магнітний ловильний пристрій (рис. 5.1) складається з корпусу, всере-



б)



а)

а – схема; б – загальний вигляд

1 – перехідник; 2 – корпус; 3 – коронка; 4 – магнітна система; 5 – кільце

Рисунок 5.1 – Пристрій магнітний ловильний ПМЛ-270

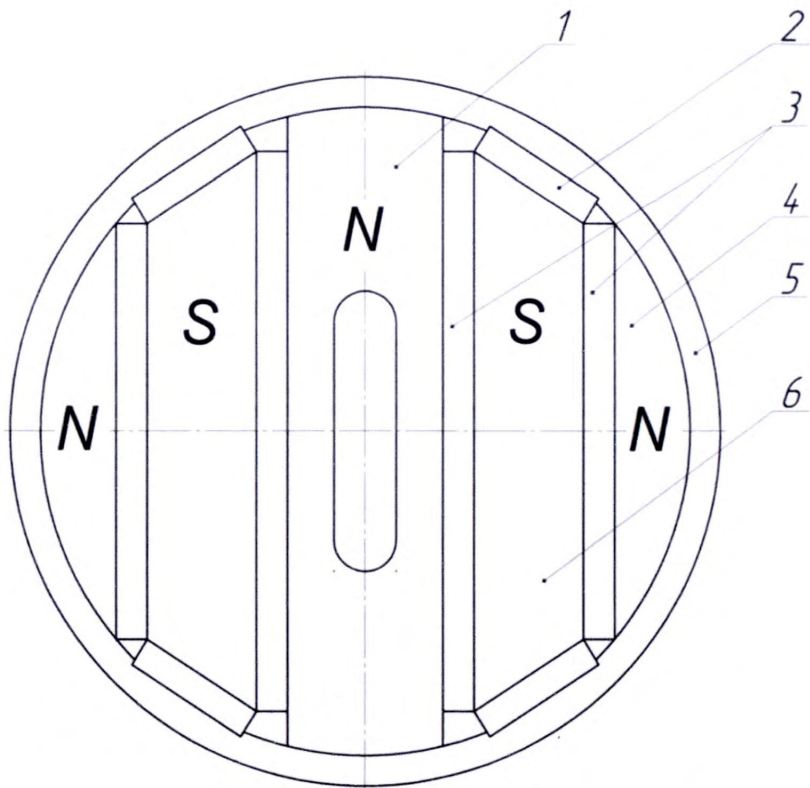
дині якого розміщена магнітна система, перехідника, призначеного для з'єднання з колоною бурильних труб та коронки.

Магнітна система (рис. 5.2) скомпонована з центрального, проміжних (пластинчатої форми) та сегментних магнітопроводів різнойменної полярності. Між ними за паралельною схемою розміщені рідкісноземельні постійні магніти. У центральному магнітопроводі виконано отвір для підводу промивальної рідини під час ловильних робіт.

Для запобігання розсіювання магнітного поля, ефективного використання магнітної енергії вперше використано метод екранування магнітного поля постійними магнітами за висотою системи ловильного пристрою. Для цього між боковими поверхнями проміжних магнітопроводів і обоймою розміщено допоміжні постійні магніти, які виконують роль екрану магнітного поля і дають можливість досягнути рівномірного розподілу магнітної індукції на поверхні магнітопроводів.

З метою концентрації магнітного поля на робочій поверхні магнітної системи, збільшення робочої площі магнітопроводів, забезпечення надійної фіксації допоміжних магнітів, підвищення технологічності складання магнітних систем передбачена обойма, що виготовлена із низьковуглецевої сталі і виконує функцію додаткового магнітопроводу.

Оригінальне розташування магнітної системи дає можливість вільного провертання корпусу, що запобігає зношенню робочої поверхні системи та збільшує термін її служби. Для цього до верхньої частини магнітної системи закріплено діамагнітну кришку з канавкою під фторопластове кільце, яке є опорою ковзання та запобігає проникненню промивальної рідини через зазор між перевідником і кришкою. Така ж канавка виконана і на торцевій поверхні перехідника, що прилягає до діамагнітної кришки. Усі повітряні проміжки між обоймою, кришкою, магнітопроводами та магнітами заливають високотемпературною смолою на епоксидній основі, що забезпечує жорсткість магнітної системи та попереджує корозію і розмивання елементів системи.



а)



б)

а – схема; б – загальний вигляд

1 – центральний магнітопровід; 2 – допоміжні магніти; 3 – постійні магніти;
4 – сегментний магнітопровід; 5 – обойма; 6 – проміжний магнітопровід

Рисунок 5.2 – Магнітна система пристрою ПМЛ-270

Схема розміщення магнітів і магнітопроводів визначає полюсний рисунок, що дає можливість віднести розроблену систему до класу броньових, які тривалий час не втрачають свої властивості під час зберігання та експлуатації.

Коронка призначена для руйнування металевих предметів і шару шламу на вибої з метою забезпечення контакту магнітної системи з уловлюваним металом. Для збільшення зносостійкості зуби коронки наплавлені твердим сплавом.

Аналогічна конструкція пристрою ПМЛ-118, в якому використана оригінальна магнітна система з центральним магнітопроводом у вигляді прямокутної призми, допоміжними магнітами та двома сегментними магнітопроводами (рис. 5.3).

У пристроях ПМЛ-146 (рис. 5.4) та ПМЛ-195 (рис. 5.5) постійні магніти в системах розділені на чотири групи та з'єднані в магнітному ланцюгу паралельно. Центральний магнітопровід виконано у формі чотирикутної призми та має полярність, протилежну чотирьом периферійним сегментним магнітопроводам.

Пристрої зовнішніми діаметрами 88 мм, 103 мм, 118 мм (рис. 5.3, 5.4) відрізняються тим, що у нижній частині корпусу нарізані зуби, які виконують функцію коронки. Таке конструктивне вирішення використовується у більшості магнітних уловлювачів невеликого діаметра з метою збільшення площі робочої поверхні системи.

Пристрій ПМЛ-115 (рис. 5.6) має направляючу воронку, виконану заодно з корпусом і призначену для захоплення видовжених металевих предметів та направлення їх до магнітної системи. Для збільшення зносостійкості ріжуча частина направляючої воронки армована твердим сплавом методом наплавлення.

Пристрої діаметрами від 88 мм до 136 мм допускають опускання у свердловину на геофізичному кабелі для зменшення часу на спуско-підіймальні операції.



Рисунок 5.3 – Пристрої ПМЛ-118 (зліва) та ПМЛ-103



Рисунок 5.4 – Пристрої ПМЛ-88 (зліва) та ПМЛ-146

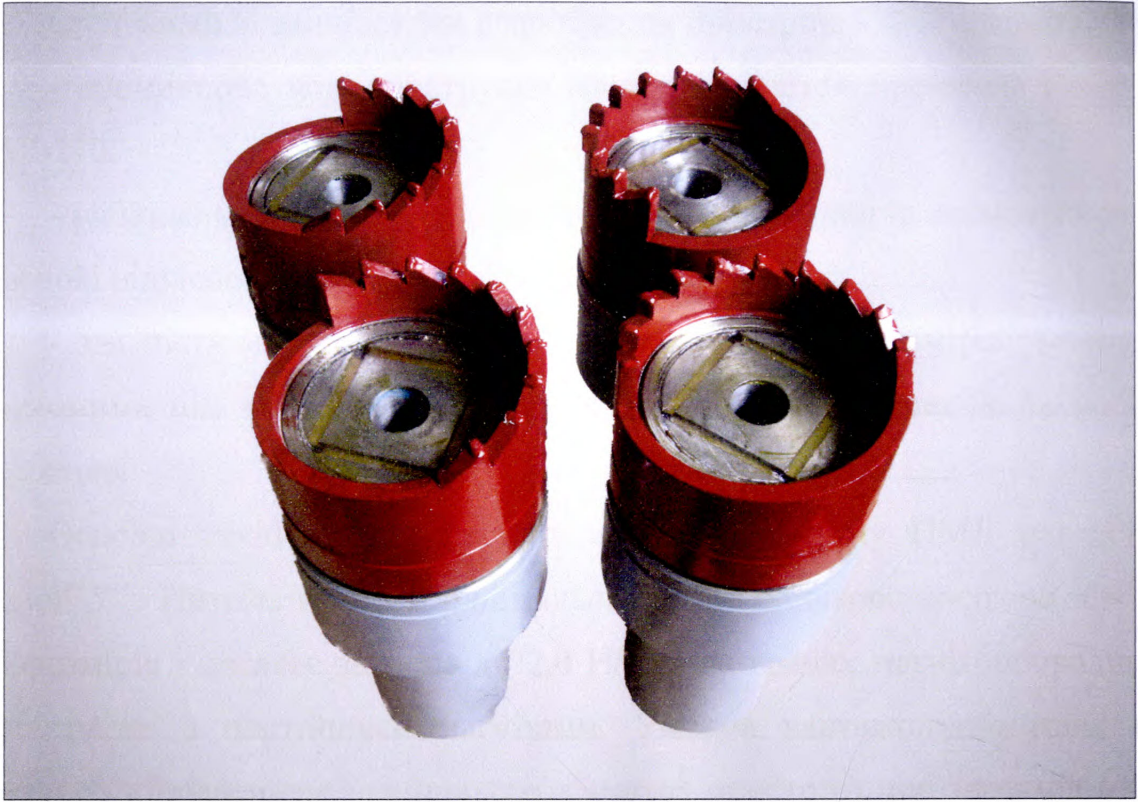


Рисунок 5.5 – Пристрої ПМЛ-195



Рисунок 5.6 – Пристрій ПМЛ-115

Суттєвими відмінностями розроблених пристроїв ПМЛ від аналогів є:

- принципово нові конструкції магнітних систем пристроїв ПМЛ-118, ПМЛ-270;
- раціональне співвідношення геометричних розмірів елементів систем на основі рідкісноземельних неодимових магнітів;
- здатність магнітних систем пристроїв усіх типорозмірів залишатися нерухомими під час ловильних робіт, що запобігає зношенню їх робочих поверхонь.

Основні технічні характеристики пристроїв типу ПМЛ наведено в таблиці 5.1. Питома вантажопідіймальна сила є однаково високою для всіх типорозмірів і досягає значень до $2,0 \text{ Н/мм}^2$ на гранях магнітопроводів, що контактують з постійними магнітами. Умовна вантажопідіймальна сила зростає зі збільшенням зовнішнього діаметра пристрою, що зрозуміло, адже відповідно збільшується корисна площа магнітопроводів і кількість пар полюсів.

Таблиця 5.1 – Технічна характеристика пристроїв ПМЛ

Показник	Типорозмір						
	ПМЛ - 88	ПМЛ - 103	ПМЛ - 115	ПМЛ - 118	ПМЛ - 146	ПМЛ - 195	ПМЛ - 270
Умовна вантажопідіймальна сила F , кН	3,8	4,7	6,2	6,7	10,4	19,6	42,3
Питома вантажопідіймальна сила F_n , Н/мм^2	від 1,4 до 2,0						
Встановлений наробіток на відмову, год (СПО)	48 (12)						
Габаритні розміри, мм:							
діаметр D	88	103	115	118	146	195	270
довжина L	295	335	363	363	390	460	510
Маса m , кг	18	20	21	22	28	58	107

5.2 Розроблення пристроїв з рухомою магнітною системою типу ФУМ

Аналіз ловильних пристроїв магнітної, гідромагнітної та магнітомеханічної дії, здійснений в розділі 1, дав можливість виявити недоліки кожного із них, а саме: невисока вантажопідіймальна сила, швидке зношення робочої поверхні магнітної системи, низька надійність роботи пружних елементів (пелюстки, пружини) та обмежена здатність утримування видовжених металевих предметів під час піднімання уловлювача на поверхню.

Для їх усунення необхідно створити магнітний пристрій, який повинен відповідати таким вимогам:

- володіти достатньою вантажопідіймальною силою;
- фрезерувати металеві предмети на вибої свердловини;
- якісно уловлювати і надійно утримувати металеві предмети під час піднімання із свердловини;
- не допускати зношення робочої поверхні системи в ході ловильних робіт;
- володіти простим і надійним способом переміщення і фіксації магнітної системи в корпусі у будь-якому положенні.

Вказаним вимогам відповідають розроблені в ІФНТУНГ пристрої з рухомою системою на основі неодимових магнітів типу ФУМ (далі фрезери-уловлювачі магнітні) зовнішніми діаметрами 112 мм і 136 мм для потреб ГПУ "Полтавагазвидобування" [10, 16].

Розглянемо конструкцію фрезера-уловлювача магнітного ФУМ – 136 (рис. 5.7, 5.8). Він містить корпус із фрезерною коронкою, армованою твердосплавними ріжучими вставками для фрезерування металевих предметів на вибої свердловини, який перехідником приєднується до колони бурильних труб. Перехідник має центральний і периферійні промивальні канали, розміщені під кутом відносно осі уловлювача. Таке розміщення каналів забезпечує можливість після фрезерування та припинення

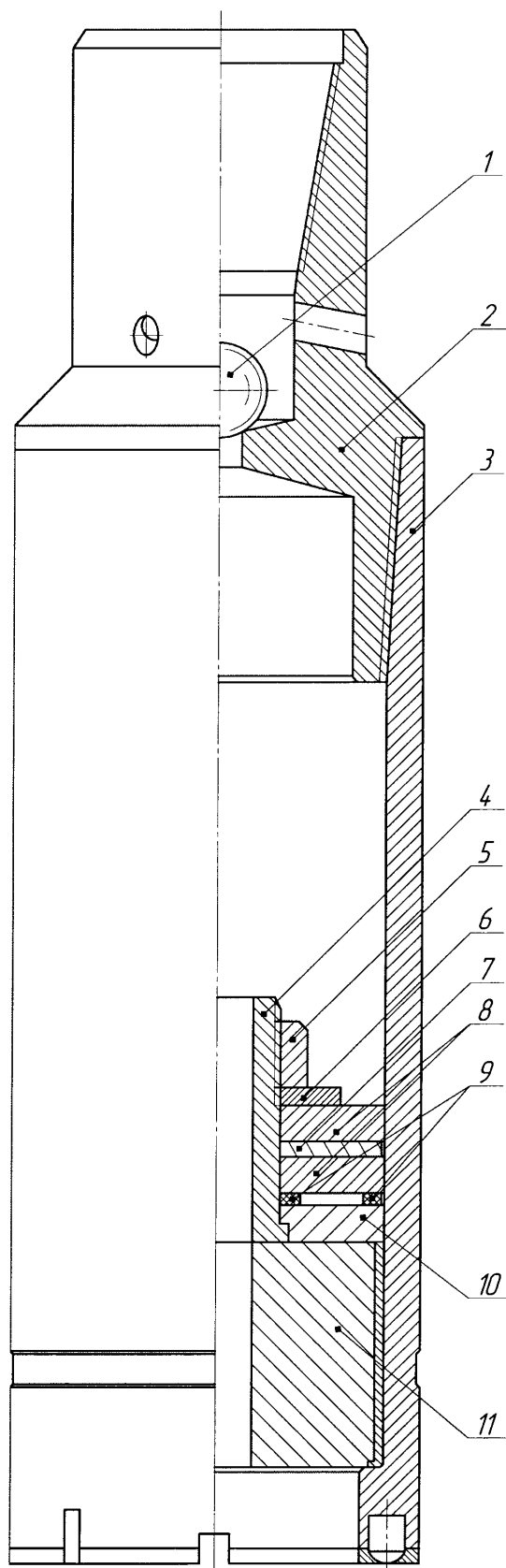
промивання свердловини опускати у внутрішню порожнину труб кульку, яка потрапивши у сідло перехідника перекриває центральний промивальний канал і під час піднімання фрезера-уловлювача направляє промивальну рідину через периферійні канали у затрубний простір для запобігання переміщення утримувальної магнітної системи в нижнє положення та відриву від основної системи уловлених феромагнітних предметів. Таким чином забезпечується надійність утримання уловлених предметів під час піднімання.

Всередині корпусу розміщені магнітні системи: основна – уловлювальна та допоміжна – утримувальна (рис. 5.9). Основна система виконує функцію притягання і утримування феромагнітних предметів, залишених на вибої свердловини. Вона складена із неодимових рідкісноземельних постійних магнітів, центрального, у вигляді чотирикутної призми, і сегментних магнітопроводів, практично не кріпиться до корпусу, що дає можливість її осьового переміщення.

Допоміжна магнітна система призначена для утримування основної системи у корпусі. Вона виконана зі з'єднаних послідовно постійного кільцевого рідкісноземельного магніту, намагніченого аксіально, і магнітопроводів аналогічної форми різнойменної полярності, закріплених до немагнітного патрубку, з'єданого з діамагнітною кришкою основної системи із зазором. Допоміжна система створює магнітне поле, яке взаємодіє з корпусом фрезера-уловлювача та утримує основну систему з притягнутими феромагнітними уламками у будь-якому положенні. Між допоміжною та основною магнітними системами розміщені два фторопластові кільця, проміжок між якими заповнений мастилом і які виконують роль опори ковзання.

Відсутність жорсткого кріплення магнітних систем до корпусу мінімізує можливість їх провертання, чим запобігає зношенню робочої поверхні основної магнітної системи.

Аналогічна конструкція пристрою ФУМ-112, тільки основна магнітна система містить центральний магнітопровід у вигляді трикутної призми.



1 – кулька; 2 – перехідник; 3 – корпус; 4 – патрубок; 5 – гайка;
 6 – шайба; 7 – постійний магніт; 8 – магнітопроводи; 9 – фторопластові
 кільця; 10 – діамагнітна кришка; 11 – основна магнітна система

Рисунок 5.7 – Схема фрезера – уловлювача магнітного ФУМ – 136

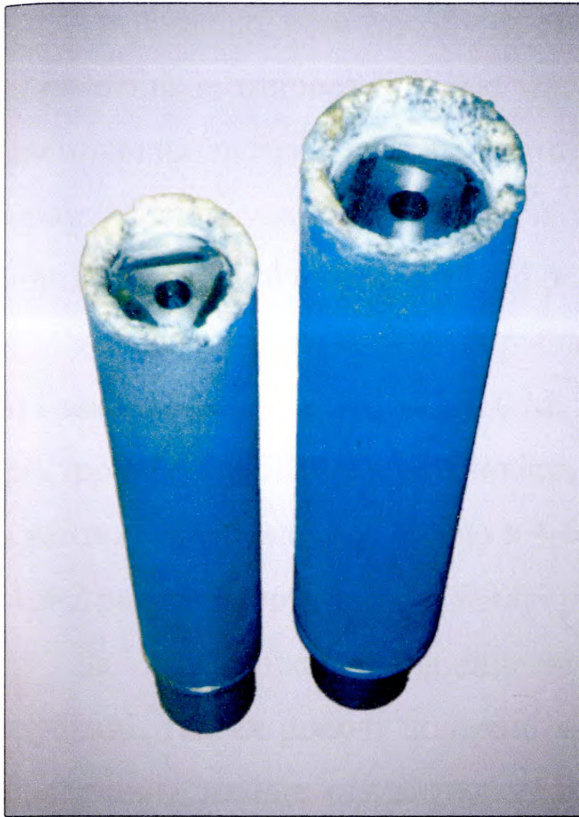


Рисунок 5.8 – Пристрої ФУМ-112
(зліва) та ФУМ-136



Рисунок 5.9 – Магнітні системи
пристроїв ФУМ-112 та ФУМ-136

Основні показники пристроїв ФУМ наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Технічна характеристика пристроїв ФУМ

Показник	Типорозмір	
	ФУМ-112	ФУМ-136
Умовна вантажопідіймальна сила F , кН	6,0	9,8
Питома вантажопідіймальна сила F_n , Н/мм ²	від 1,4 до 2,0	
Максимальне зусилля переміщення магнітної системи F_{zc} , кН	2,0	2,0
Довжина ходу магнітної системи l_c , мм	250	250
Габаритні розміри, мм:		
діаметр D	112	136
довжина L	650	700
Маса m , кг	38	52

Розроблено конструкції фрезерів-уловлювачів з рухомою магнітною системою двох типорозмірів, які завдяки збільшенню робочої ділянки шляхом переміщення системи забезпечують повне очищення вибою свердловини від феромагнітних уламків. Суттєвою відмінністю пристроїв ФУМ від аналогічних є магнітний спосіб фіксації основної системи у робочому положенні.

Аналіз характеристик розроблених (ПМЛ і ФУМ), вітчизняних (УОЗ) [3] і закордонних (ФЛМ, МСЛ, ФМ, FM) [6, 30, 53, 111] магнітних ловильних пристроїв (табл. 5.3) дав можливість встановити, що пристрої ПМЛ та ФУМ за вантажопідіймальною силою в 4-6 разів перевищують аналоги з литими та в 1,5-2 рази – з феритовими (УОЗ) і рідкісноземельними (СМЛ) магнітами.

За показниками надійності розроблені пристрої перевищують зарубіжні, так як робочі поверхні магнітних систем за рахунок відсутності повертання менше піддаються зношенню під час контакту з аварійними предметами.

5.3 Кваліметричний аналіз магнітних ловильних пристроїв

З метою оцінки технічного рівня розроблених пристроїв ПМЛ та ФУМ проведено кваліметричний аналіз відомих магнітних ловильних пристроїв. Для цього зібрано та впорядковано паспортні показники магнітних пристроїв для очищення свердловин 185 моделей, які виготовляються 15 машинобудівними компаніями шести країн світу. Варто зазначити, що частина виробників нині не існує, проте їх продукція продовжує експлуатуватися, що дає підстави вносити її до загальної сукупності даних.

Кваліметричний аналіз проведено за методикою [110], в якій застосовано методи математичної статистики, у тому числі апарат регресійного аналізу. Для дослідження обрано такі параметри:

- зовнішній діаметр D , мм;
- умовна вантажопідіймальна сила F , кН;
- маса m , кг.

Таблиця 5.3 – Порівняльні характеристики магнітних ловильних пристроїв

Діаметр ловильного пристрою D, мм	Пристрої ПМЛ, ФУМ ¹⁾ (ІФНТУНГ)		Пристрої УОЗ (ІФІНГ)		Фрезери магнітні ФЛМ (ЗАГ "Измерон" ²⁾ , Росія)	Магнітні уловлювачі МСЛ ²⁾ (Росія)	Фрезери магнітні ФМ (Азербайджан)		Bowen Fishing magnets (США)	
	F, кН	m, кг	F, кН	m, кг			F, кН	m, кг	F, кН	m, кг
88-92	4,5	18	2,6	18	1,7	3,5	0,7	17	0,4	12
103	5,0	20	4,0	23	2,5	-	0,8	23	0,8	25
112	6,3 ¹⁾	28	-	-	2,5	-	-	-	-	-
115	7,0	24	3,8	28	2,5	-	0,95	18	1,1	39
118	7,2	22	-	-	2,5	5,5	1,0	24	-	-
135-136	9,1 ¹⁾	52	6,0	35	4,5	-	1,2	38	1,4	57
146-150	10,0	28	6,5	70	6,5	7,0	2,4	45	1,7	62
195	19,6	58	10,0	80	8,5	9,0	3,2	110	3,1	113
270-275	40,7	107	19,0	145	10,0	21,8	6,8	160	4,5	237

Примітки: ¹⁾ Пристрої з рухомими магнітними системами.

²⁾ Значення маси відсутнє.

Зрозуміло, що зі збільшенням діаметра пристрою зростає вантажопідіймальна сила. Цьому сприяє більша площа полюсів магнітопроводів, а не втілені конструктивні рішення чи обґрунтований вибір матеріалів. Тому, для досягнення спільномірності досліджуваних показників пристроїв різних діаметрів (можливість розгляду параметрів усієї сукупності моделей як єдиної вибірки), наведені вище показники замінено їх питомими еквівалентами:

- питомою вантажопідіймальною силою $4F/\pi D^2$, Н/мм²;
- питомою матеріаломісткістю m/F , кг/Н.

На жаль, інформація щодо маси ловильних пристроїв є досить обмеженою: не більше третини виробників повідомляють її величину. Через це репрезентативну вибірку одержати неможливо, що змусило відмовитися від дослідження показника питомої матеріаломісткості.

Фізичний зміст питомої вантажопідіймальної сили $4F/\pi D^2$ – зусилля відриву ловильного пристрою діаметром D від плити, виготовленої зі сталі 10, що припадає на одиницю робочої поверхні за умови її повного перекриття. Зі значень питомих показників $4F/\pi D^2$ та паспортних параметрів D утворено і перевірено на однорідність двовимірну вибірку. Методами регресійного аналізу двовимірний масив апроксимовано монотонними неперервними функціями $4F/\pi D^2 = f(D)$. Віднайдені в результаті рівняння (5.1) є математичною моделлю середньостатистичного рівня для досліджуваних моделей магнітних ловильних пристроїв:

$$\frac{4F}{\pi D^2} = 0,0835 \cdot D^{0,1818}. \quad (5.1)$$

Важливим також є завдання визначення параметрів ловильних пристроїв, які відповідають сучасному світовому рівню. Для цього виділяємо із загальної сукупності моделей ті, в яких відносні відхилення питомої вантажопідіймальної сили, обчислені за рівнянням середньостатистичного рівня, є позитивними значеннями. Одержаний масив піддано регресійному

аналізу аналогічно, як для масиву повних даних. Рівняння (5.2) є математичною моделлю сучасного світового рівня магнітних ловильних пристроїв:

$$\frac{4F}{\pi D^2} = 0,348 \cdot D^{-0,01} . \quad (5.2)$$

Одержані математичні моделі дають змогу оцінити технічний рівень пристроїв на стадії розроблення і випробування дослідного взірця. Графіки функцій, побудованих за рівняннями (5.1, 5.2), зображено на рис. 5.10. Як бачимо, значення питомої вантажопідіймальної сили розроблених пристроїв ПМЛ та ФУМ значно перевищують як середньостатистичний, так і сучасний світовий технічні рівні, що свідчить про їх досконалість і конкурентоздатність на світовому ринку.

Кваліметричний аналіз магнітних ловильних пристроїв показав перевагу пристроїв ПМЛ та ФУМ над відомими аналогами, що свідчить про їх високий рівень. Втілені технічні рішення роблять їх конкурентоздатними на світовому ринку, що є вагомою причиною для освоєння серійного виробництва.

5.4 Промислові випробування магнітних ловильних пристроїв

З метою визначення працездатності розроблених магнітних ловильних пристроїв типу ПМЛ та ФУМ в умовах експлуатації, підтвердження результатів стендових випробувань і оцінки технічного рівня проведено дослідно-промислові випробування пристроїв у свердловинах.

Для випробувань підприємствами ТзОВ НТФ "Інтербур", ГПУ "Полтавагазвидобування" та ПП "ВЕЛЛ" були виготовлені і передані буровим та нафтогазопромисловим підприємствам України і Литви двадцять п'ять експериментальних зразків магнітних пристроїв ПМЛ діаметрами 88 мм, 103 мм, 115 мм, 118 мм, 146 мм, 195 мм, 270 мм та чотири пристрої ФУМ діаметрами 112 мм і 136 мм.

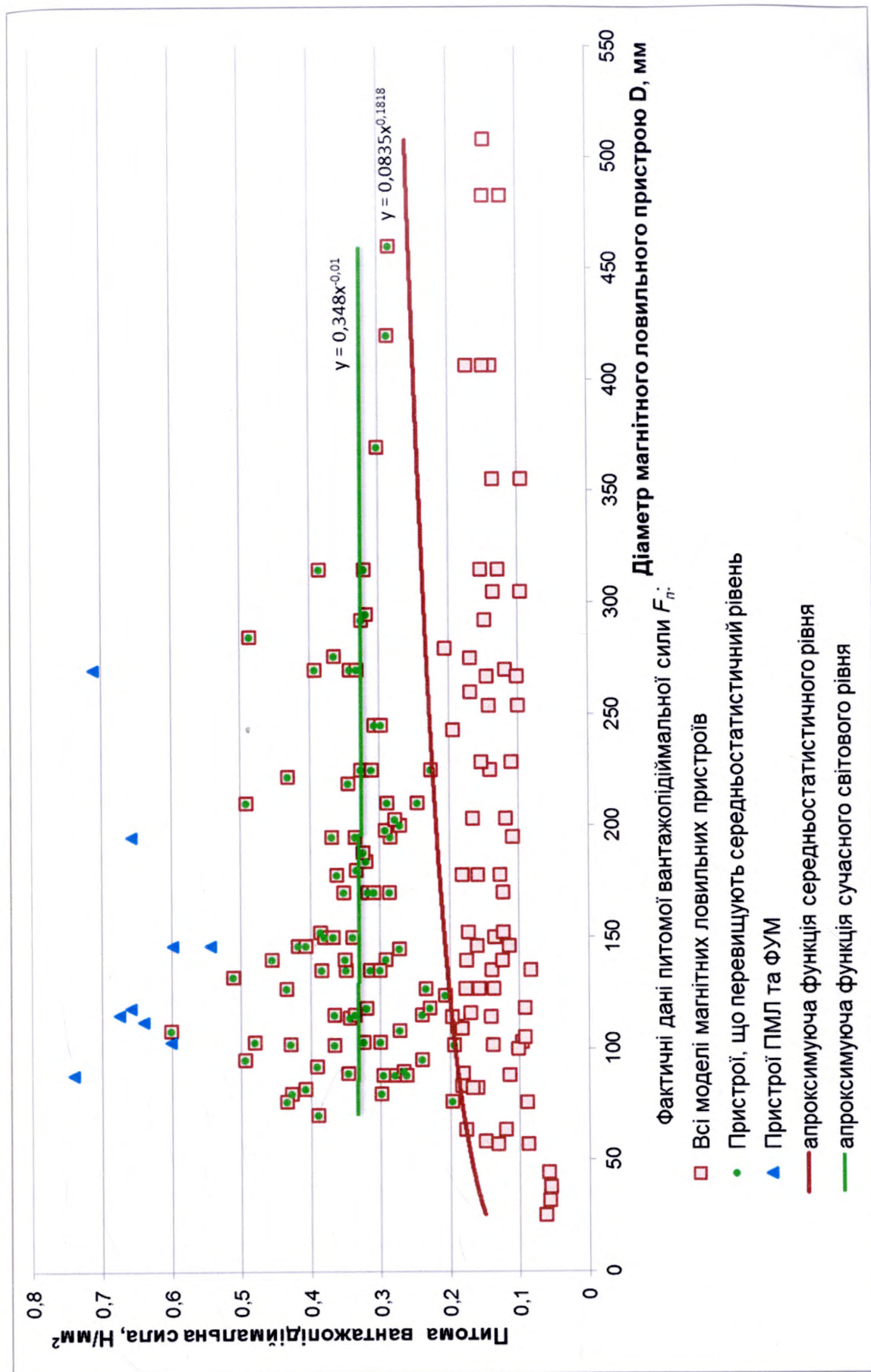


Рисунок 5.10 – Залежність питомої вантажопідіймальної сили магнітних ловильних пристроїв від зовнішнього діаметра

У ході дослідно-промислових випробувань ставились наступні завдання:

1 Встановити ефективність роботи розроблених пристроїв під час ліквідації аварій в процесі буріння та ремонту свердловин.

2 Визначити вплив експлуатаційних чинників: промивальної рідини, температури, гідростатичного тиску, вібрації, ударів на силові характеристики магнітних систем.

3 Підтвердити здатність магнітних ловильних пристроїв уловлювати твердосплавні елементи породоруйнівного інструменту.

4 Провести порівняльні випробування розроблених пристроїв на основі постійних магнітах із рідкісноземельних матеріалів і пристроїв для очищення свердловин (УОЗ) із феритовими магнітами.

5 Визначити економічну ефективність від використання розроблених пристроїв.

Випробування проводилися з 2010 по 2013 роки на бурових (ТОВ "Бурінтехсервіс", LOTOS Geonafta – Литва), нафтогазопромислових (ГПУ "Полтавагазвидобування"), та геофізичних (ДП "Полтавське управління геофізичних робіт"), підприємствах України та Литви за програмою і методикою експлуатаційних випробувань ФУМ-00-00-000 ПМ-1, затвердженою ГПУ "Полтавагазвидобування".

Порядок роботи пристроїв ПМЛ та ФУМ під час випробувань наступний. За допомогою замкової різьби пристрій приєднували до колони бурильних труб і опускали у свердловину зі швидкістю не більше 2 м/с. На відстані від 5 м до 10 м відновлювали циркуляцію промивальної рідини і пристрій з провертанням доводили до вибою (аварійного предмету), який промивали протягом 15 хв. Після цього припиняли циркуляцію рідини і пристрій ПМЛ без обертання 2-3 рази припіднімали на 1-2 м і розвантажували на вибій (аварійний предмет) із зусиллям до 10 кН. Далі пристрій піднімали на поверхню зі швидкістю до 1 м/с.

Під час опускання ПМЛ на геофізичному кабелі швидкість не перевищувала 1,3 м/с. Ловильні роботи проводилися без провертання пристрою і промивання свердловини. Досягнувши контакту з аварійними предметами пристрій декілька раз піднімали і опускали на вибій, після чого пристрій з уловленими частинами піднімали на поверхню зі швидкістю від 1 м/с до 3 м/с.

Дещо інший порядок роботи пристрою ФУМ. Після опускання його в свердловину і промивання вибою, не зупиняючи обертання і циркуляцію промивальної рідини, розпочинали фрезерувати залишений метал до досягнення контакту з вибоєм. При цьому магнітна система пристрою ФУМ-112 перемістилася вгору на 210 мм, а ФУМ-136 – на 50 мм, що відповідало довжині залишених у свердловині предметів.

Режим роботи пристроїв ПМЛ та ФУМ наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Режим роботи пристроїв ПМЛ і ФУМ під час СПО на бурильних трубах

Тип магнітного пристрою	Подача насоса, м ³ /с	Осьове навантаження, кН	Частота обертання, хв ⁻¹
ПМЛ-88	0,012	2-3	20-40
ПМЛ-270	0,023	5-10	20-40
ФУМ-112	0,012	10-15	50-60
ФУМ-136	0,012	15-20	50-60

Тривалий період випробувань у свердловинах різного призначення дав можливість зібрати і проаналізувати інформацію про роботу магнітних ловильних пристроїв (табл. 5.5) [18, 112].

Умови випробувань: глибина свердловин – від 59 м до 4898 м; стовбур свердловини – відкритий, обсаджений; умовний діаметр стовбура – від 108 мм до 296 мм; температура на вибої – до 118 °С; пластовий тиск – від 0,5 МПа до 58 МПа; промивальна рідина – технічна вода, буровий розчин з густиною до 1240 кг/м³; спуско-підіймальні операції – на бурильних трубах, геофізичному кабелі зі швидкістю до 1,3 м/с.

Таблиця 5.5 – Результати дослідно-промислових випробувань магнітних ловильних пристроїв

Місце випробування	Площа (родовище), свердловина	Характеристика свердловини				Температура на вибої, °С	Мета опускання ловильного пристрою	Результати випробування	
		Глибина вибою, м	Умовний діаметр свердловини, мм	Пластовий тиск, МПа	Ловильний пристрій			Кількість СПО	Маса піднятого металу, кг
ТОВ "Бурінгтехсервіс", Україна	Свирідівська, № 53	4123	295,3	51	102	Вилучення шарошки і елементів опор долота III 295,3 REED R15A	ПМЛ-270	1	9,2
LOTOS Geonafta, Литва	Genciai-14	2121	108	20,2	56	Вилучення металу після фрезерування труб	ПМЛ-88	3	5,2
ГПУ "Полтавагаз-видобування", Україна	Матвіївське ГКР, № 60 Західно-Солохівське ГКР, № 100	3961	168	34,6	112	те саме	УОЗ-136 ФУМ-136	1 1	3,2 6,8
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Матвіївське ГКР, № 67 Котелевське ГКР, № 75	3510	146	35,5	86	те саме	ПМЛ-115	4 (на кабелі)	8,5
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Луценківська, № 1 Скоробагатівське ГКР, № 57	3657	146	37,0	91	те саме	ПМЛ-115	7 (на кабелі)	13,6
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Козіївське НКР, № 21	59	168	0,5	-	Вилучення клина ротора і кільця	ПМЛ-115	2 (на кабелі)	12
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Шкурупіївська, № 1	4091	122	42,0	102	Вилучення шарошок долота	ПМЛ-88	4 (на кабелі)	3,0
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Козіївське НКР, № 21	2505	146	25,5	64	Вилучення аварійного предмету (пластина)	ПМЛ-115	1 (на кабелі)	2,5
ДП "Полтавське управління геофізичних робіт", Україна	Шкурупіївська, № 1	3403	146	35,0	75	Вилучення частин долота, твердого сплаву	ПМЛ-88	5 (на кабелі)	10,3

У ході випробувань частини зруйнованих бурових доліт, аварійні металеві феромагнітні предмети і твердосплавні елементи, незалежно від форми та розміщення у свердловині, вилучалися переважно за одну СПО. Так, під час буріння свердловини № 53 Сверидівської площі, на глибині 4123 м внаслідок поломки долота III-295,3 REED R15A залишилися шарошка та тіла кочення опори. За один рейс пристроєм ПМЛ-270 було очищено вибій свердловини від металу, причому шарошка, армована твердосплавними зубками, була захоплена магнітною системою за вершину (додаток А). Для вилучення зруйнованого долота діаметром 122 мм знадобилось 4 рейси пристрою ПМЛ-88 на геофізичному кабелі для підняття трьох шарошок із свердловини № 57 Скоробагатівського ГКР. Ловильні роботи проводилися без промивання та обертання пристрою (додаток А).

У більшості випадків очищення вибою проводилося після фрезерування залишених у свердловинах елементів низу бурильної колони та обірваних насосно-компресорних труб (НКТ). Під час аварійних робіт кільцевими і торцевими фрезерами на верхній частині аварійних бурильних труб та НКТ накопичувалися невинесені промивальною рідиною металеві уламки. Продукти фрезерування, що перешкоджали подальшому проведенню аварійно-відновлювальних робіт, вилучалися із свердловин періодично в міру їх накопичення.

Аналіз результатів порівняльних випробувань пристроїв ПМЛ, ФУМ діаметром 136 мм та аналога УОЗ-136 у свердловинах № 60 Матвіївського ГКР і № 100 Західно-Солохівського ГКР показав, що розроблені пристрої за один рейс здатні вилучати у два рази більше металу, ніж УОЗ, а пристрої з рухомою системою ефективні для вилучення видовжених металевих предметів (додаток А). Необхідно зазначити, що практично в усіх пристроях ПМЛ і ФУМ під час випробувань не виявлено зношення робочих поверхонь магнітних систем, навіть після трьох спусків у свердловину. Це пояснюється оригінальним конструктивним вирішенням магнітної системи, а саме – можливістю перебування в нерухомому стані під час обертання корпусу з

коронкою. Тому можна стверджувати, що робочі поверхні систем менше піддаються зношенню, що збільшує ресурс роботи розробленого пристрою порівняно з аналогом.

Висока температура – до 118 °С та глибина 4898 м свердловини № 100 Західно-Солохівського газоконденсатного родовища не вплинули на ефективність роботи пристрою ФУМ-112, яким за один рейс вилучено із свердловини частину бурильної труби діаметром 73 мм, довжиною 223 мм, металеву стружку і твердосплавні елементи ріжучої частини кільцевих і вибійних фрезерів загальною масою 8,2 кг (додаток А).

Вплив вібрації та ударів на працездатність розроблених пристроїв у свердловинах не досліджувався у зв'язку з недостатнім обсягом випробувань. Проте, базуючись на результатах досліджень аналогічних пристроїв УОЗ [3], можна стверджувати, що за дотримання режимів роботи названі вище чинники не впливають на характеристики магнітних пристроїв.

На робочих поверхнях усіх пристроїв, що піддавалися випробуванням, окрім феромагнітних уламків було виявлено велику кількість скрапу. Це свідчить про необхідність періодичного очищення свердловини від металу не очікуючи аварійної ситуації.

Таким чином, дослідно-промислові випробування розроблених на основі постійних рідкісноземельних магнітів ловильних пристроїв типу ПМЛ і ФУМ підтвердили результати теоретичних та експериментальних досліджень, ефективність роботи під час очищення свердловин від фрезерованих предметів різної форми і маси, здатність уловлювати твердосплавні елементи, стабільність магнітних і силових параметрів у складних умовах експлуатації, а також значну перевагу перед аналогічними пристроями на основі феритових магнітів.

Прогнозований економічний ефект від проведення аварійно-відновлювальних робіт розробленими пристроями становить приблизно 1,35 млн. грн. (додаток А).

5.5 Перспективи вдосконалення магнітних ловильних пристроїв

Порівняльний аналіз характеристик розроблених пристроїв з відомими на даний час у світі аналогами дає можливість стверджувати, що пристрої ПМЛ та ФУМ володіють значно вищими параметрами, а дослідно-промислові випробування підтвердили ефективність їх використання під час ловильних робіт у свердловинах. Незважаючи на це, сучасний рівень науки і техніки дає змогу підвищити і до того високі показники розроблених пристроїв. На даний час роботи з удосконалення засобів для очищення вибоїв свердловин від металу і шламу проводяться в декількох напрямках.

Можливість серійного виробництва ставить вимогу використання недефіцитних і недорогих матеріалів для виготовлення ловильних пристроїв. Цей принцип дотриманий за винятком магнітотвердих матеріалів, де використано відносно високовартісні постійні рідкісноземельні магніти. У розроблених пристроях використано неодимові магніти марок N38 та N42SH з максимальним енергетичним добутком від 287 кДж/м³ до 343 кДж/м³, тоді як на сьогоднішній день доступні неодимові магніти з енергетичних добутком до 422 кДж/м³, а в майбутньому планується подальше підвищення характеристик. Окрім того, проводяться дослідження з розроблення нанокompозитних магнітних матеріалів [67], параметри яких перевершать усі існуючі донині постійні магніти.

Щодо магнітом'яких матеріалів, то найвищою індукцією насичення – до 2,45 Тл на сьогодні володіє пермендюр - сплав заліза із кобальтом і невеликим вмістом ванадію. Такі сплави поставляються виробниками у вигляді холодно- та гарячекатаних листів, тож можуть бути використані як магнітопроводи. Знову ж таки перешкодою до використання є висока вартість, що значно перевершує вартість якісних низьковуглецевих сталей.

Проведені теоретичні дослідження показали, що використання неодимових магнітів марки N52 (енергетичний добуток 390-422 кДж/м³) разом з магнітопроводами зі сплаву VACOFLUX 48 (49,0 % Co, 1,9 % V,

решта Fe) з індукцією насичення 2,35 Тл дасть можливість підвищити вантажопідіймальну силу пристроїв ПМЛ до 50 % за незмінної геометрії та розмірів самої системи. Так як це збільшить у декілька разів вартість пристроїв, то даний варіант є прийнятним тільки в особливих умовах. Як приклад – ліквідація аварій в надглибоких свердловинах, коли критично важливо за мінімальну кількість рейсів підняти металеві предмети.

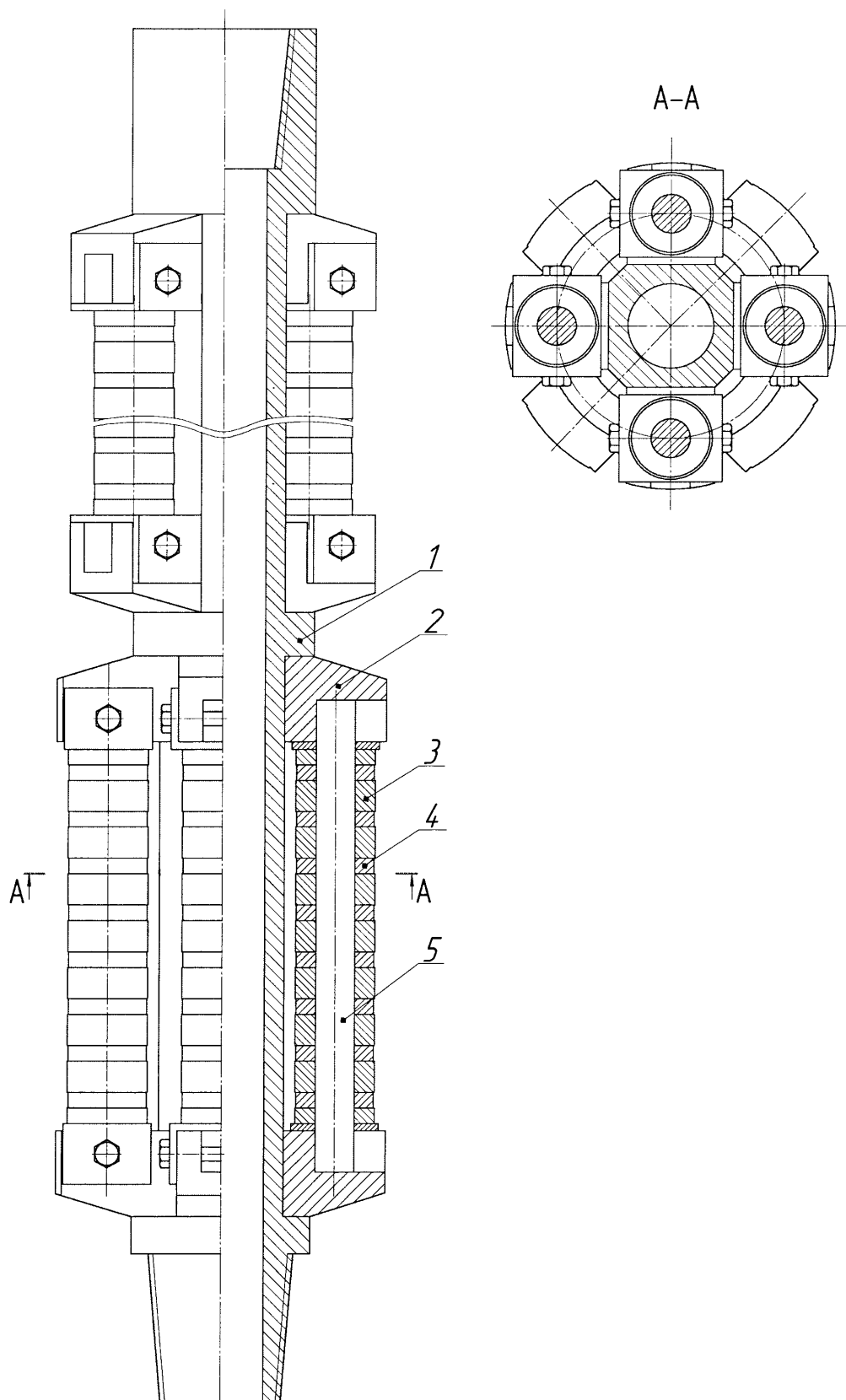
Постійно вдосконалюється і конструкція магнітних ловильних пристроїв та їх систем. Найбільш раціональною є магнітна система з кільцевими магнітами і циліндричними магнітопроводами, яка характеризується рівномірним розподілом магнітного поля на робочій поверхні та мінімальними потоками розсіювання на зовнішній циліндричній поверхні системи. Перешкодою для створення таких систем є складність технології виготовлення суцільних радіально-намагнічених постійних магнітів з анізотропними властивостями в радіальному напрямку. Вирішити цю проблему можна за рахунок компонування магнітної системи циліндричними сегментами.

Одним зі шляхів підвищення ефективності уловлення важких і габаритних предметів, наприклад, цілих доліт, залишених на вибої через пошкодження приєднувальної різьби, є удосконалення розробленого пристрою ФУМ. Замість однієї магнітної системи пропонується використовувати декілька, при цьому переміщення систем здійснюється під час контакту з предметом незалежно одна від іншої, що дасть змогу адаптуватися до неправильної форми предмету та збільшити площу контакту з ним. Магнітний спосіб фіксації дасть можливість надійно утримувати кожен систему і транспортувати аварійні предмети на поверхню. Так як розміри елементів магнітних систем значно зменшаться, то проблемою може стати виготовлення броньових систем невеликого діаметра. Конструктивно це можна вирішити за рахунок кільцевих магнітів і магнітопроводів, описаних вище, але тільки в найближчому майбутньому.

Всі магнітні ловильні пристрої володіють значним недоліком – необхідність проведення додаткових спуско-підіймальних операцій, кількість яких залежить від розмірів і маси залишеного на вибої металу. Важливо періодично очищувати вибій свердловини від дрібних металевих предметів інструментом у складі компоновки бурильної колони під час буріння або фрезерування. Огляд пристроїв гідромагнітної та гідродинамічної дії (розділ 1) виявив їх значні недоліки, окрім того практично відсутні засоби магнітної дії. Зважаючи на це, розроблено магнітний металоуловлювач для періодичного профілактичного очищення вибоїв свердловин від феромагнітних предметів під час буріння та проведення аварійно-відновлювальних робіт [113, 114].

Магнітний металоуловлювач (рис. 5.10) складається з корпусу для з'єднання з бурильною колоною та породоруйнівним або ловильним інструментом, до якого за допомогою лап і стержнів прикріплені системи з кільцевих магнітопроводів і магнітів. Магнітні системи виконані відкритими для обтікання промивальною рідиною та розміщені двома ярусами, причому верхній ярус зміщений відносно нижнього на 45° . Таким чином, створюються умови для ефективного уловлювання феромагнітних частин, позаяк промивальна рідина постійно омиває магнітні системи. Під час промивання рідина проходить внутрішнім каналом металоуловлювача, потрапляє до зони руйнування породи (аварійного предмету), де захоплює зруйнований метал та породу і виносить їх у затрубний простір. При цьому рідина омиває магнітні системи, які вилучають із неї феромагнітні частинки.

Використання металоуловлювача магнітного дасть змогу підвищити показники роботи бурових доліт, фрезерів і попереджувати аварії. До того ж, спільне застосування із розробленими пристроями ПМЛ зменшить кількість спуско-підіймальних операцій, і, як наслідок, мінімізує витрати часу і коштів на профілактичні та аварійно-відновлювальні роботи у свердловинах.



1 – корпус; 2 – лапа; 3 – постійний магніт; 4 – магнітопровід; 5 – стержень

Рисунок 5.11 – Схема магнітного металоловлювача

Отже, подальший розвиток магнітних ловильних пристроїв можливий за рахунок як удосконалення конструкцій їх систем, так і використання сучасних матеріалів з високими магнітними властивостями. Це дасть можливість досягнути максимальних силових і магнітних характеристик пристроїв, а також розширити межі використання під час проведення аварійно-відновлювальних робіт і профілактичному очищенню вибоїв свердловин, в тому числі і надглибоких.

Висновки до розділу 5

1. Розроблено нові конструкції магнітних ловильних пристроїв ПМЛ діаметрами 88 мм, 103 мм, 115 мм, 118 мм, 146 мм, 195 мм та 270 мм і пристроїв ФУМ діаметрами 112 мм, 136 мм, які за основним показником призначення – вантажопідіймальною силою в 1,5-6 разів перевищують аналоги з Росії та США.

2. Нові технічні рішення на рівні винаходів, реалізовані у конструкціях ПМЛ та ФУМ: здатність системи залишатися нерухомою під час обертання корпусу та магнітний спосіб її фіксації у будь-якому положенні дали можливість підвищити на 30 % ресурс роботи пристроїв.

3. Дослідно-промислові випробування у глибоких нафтогазових свердловинах різного призначення підтвердили високу ефективність роботи пристроїв під час вилучення різних за формою і масою феромагнітних предметів, у тому числі і тврдосплавних, за температури до 118 °С, гідростатичному тиску до 63 МПа, у середовищі промивальної рідини густиною до 1240 кг/м³. Особливо потрібно відзначити здатність пристроїв ФУМ вилучати видовжені феромагнітні предмети.

4. За результатами випробувань розроблені пристрої рекомендовані для проведення ловильних і аварійно-відновлювальних робіт у нафтових і газових свердловинах України і Литви. Економічний ефект на один пристрій ПМЛ-270 становить 410 тис. грн., прогнозований ефект від впровадження

пристроїв ПМЛ-115 та ПМЛ-88 – 950 тис. грн.

5. Основними напрямками вдосконалення магнітних ловильних пристроїв є використання сучасних матеріалів і розроблення нових конструкцій, що дасть можливість підвищити характеристики пристроїв до 50 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у підвищенні ефективності очищення вибоїв свердловин від феромагнітних предметів пристроями на основі постійних магнітів із рідкісноземельних матеріалів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виконані автором, дають можливість зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз стану вибою під час спорудження та ремонту свердловин вказує на наявність металевих предметів різної форми та походження, що знижує техніко-економічні показники поглиблення свердловин і є причиною аварій з породоруйнівним інструментом. Ефективним способом вилучення із свердловини аварійних предметів без їх попереднього руйнування є використання пристроїв на основі постійних магнітів.

2. Обґрунтовано вибір рідкісноземельних магнітотвердих матеріалів як таких, що володіють найвищими характеристиками серед відомих постійних магнітів і найбільш повно задовольняють вимоги до систем ловильних пристроїв. Розроблено конструкції броньових магнітних систем на основі висококоерцитивних неодимових магнітів.

3. За результатами тривимірного моделювання встановлено раціональні співвідношення геометричних розмірів елементів магнітних систем, що дало можливість одержати високі силові параметри ловильних пристроїв. Запропоновано силовий критерій для оцінки ефективності магнітних систем, за яким розроблені системи в три рази переважають відомі аналоги на ферито-барієвих магнітах. Теоретично встановлено можливість ефективного використання розроблених пристроїв у свердловинах за температури до 150 °С.

4. Удосконалено метод дослідження магнітних систем, що дав можливість визначити їх тягові характеристики, а також може

використовуватися для дослідження різних конструкцій систем ловильних пристроїв. Одержані результати експериментальних досліджень (розподіли магнітної індукції та тягові характеристики) підтвердили теоретичні розрахунки і достовірність рекомендацій з проектування магнітних систем з високими силовими та магнітними характеристиками.

5. Розроблено конструкції магнітних пристроїв дев'яти типорозмірів, що володіють в 1,5-6 разів вищою вантажопідіймальною силою, ніж відомі аналоги. Шляхом втілення нових технічних рішень, а саме запобігання повертання магнітної системи (патент № 99790) та магнітному способу фіксації системи у будь-якому положенні в корпусі (патент № 100087) вдалося підвищити ресурс роботи розроблених пристроїв. Кваліметричний аналіз серійних моделей магнітних ловильних пристроїв світових виробників підтвердив високий технічний рівень створених пристроїв ПМЛ та ФУМ. Дослідно-промислові випробування розроблених ловильних пристроїв типу ПМЛ та ФУМ на бурових, нафтогазопромислових та геофізичних підприємствах України і Литви підтвердили високу ефективність під час ліквідації аварій, пов'язаних із залишенням на вибої феромагнітних предметів. Прогнозований економічний ефект від проведення аварійно-відновлювальних робіт розробленими пристроями становить приблизно 1,35 млн. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Количественная оценка качества ремонтных работ в скважинах / Э. А. Ахмадуллин, В. И. Балаба, В. С. Зарецкий, В. Я. Кершенбаум // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – № 8. – С. 14-18.
2. Буровое оборудование: Справочник: в 2-х т. Т. 2.: Буровой инструмент / В. Ф. Абубакиров, В. Л. Архангельский, Ю. Г. Буримов [и др.]. – М.: Недра, 2000. – 494 с.
3. Магнитные устройства для очистки скважин / Ю. А. Курников, И. Ф. Концур, М. Т. Кобылянский, Л. И. Романишин; под. ред. Ю. А. Курникова. – Львов: Вища школа, 1988. – 108 с.
4. Аношкин А. П. Новое в технологии капитального ремонта скважин / А. П. Аношкин, С. А. Аношкин. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2003. – 24 с.
5. Гасанов А. П. Аварийно-восстановительные работы в нефтяных и газовых скважинах / А. П. Гасанов. – М.: Недра, 1987. – 185 с.
6. National Oilwell VARCO. BOWEN Fishing Magnets [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.nov.com/Downhole/Fishing_Tools/Junk_Catch_Fishing_Tools/Fishing_Magnets.aspx
7. Куневич А. В. Ферриты: энциклопедический справочник: в 5 т. Т. 1.: Магниты и магнитные системы. / А. В. Куневич, А. В. Подольский, И. И. Сидоров. - СПб.: Информационно-издательское агенство «ЛИК», 2004. – 358 с.
8. Менушенков В. П. Новые магнитотвердые материалы, вопросы использования и области применения / В. П. Менушенков // Электротехника. – 1999. – № 10. С. 1–4.
9. Пат. 99790 Україна, МПК E21B 31/06. Уловлювач магнітний / Є. І. Крижанівський, Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин; заявник і патентовласник Є. І. Крижанівський, Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин. – №a2011 09349; заявл. 26.07.2011; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18. – 6 с.

10. Пат. 100087 Україна, МПК E21B 31/06. Фрезер-уловлювач з рухомою магнітною системою / Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин, І. С. Атаманчук, Є. В. Діброва, Я. С. Білецький, М. С. Білецький; заявник і патентовласник Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин, І. С. Атаманчук, Є. В. Діброва, Я. С. Білецький, М. С. Білецький. – № а2011 08838; заявл. 14.07.2011; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. – 5 с.

11. Романишин Л. І. Дослідження впливу конструктивних чинників на ефективність роботи магнітних ловильних пристроїв / Л.І. Романишин, Т.Л. Романишин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2010. — Вип. 13. — С. 66-71.

12. Романишин Т. Л. Дослідження магнітних характеристик систем ловильних пристроїв / Т. Л. Романишин // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії - 2012», 5-7 листопада 2012 р. : Тези доповідей. – Івано-Франківськ. – 2012. – С. 224-227.

13. Романишин Т. Л. Обґрунтування вибору матеріалів постійних магнітів для ловильних пристроїв / Т. Л. Романишин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 1. С. 143-152.

14. Романишин Т. Л. Обґрунтування вибору раціональних конструкцій магнітних систем ловильних пристроїв / Т. Л. Романишин // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2013», 7-11 жовтня 2013 р. : Тези доповідей. – Івано-Франківськ. – 2013. – С. 89-92.

15. Романишин Л. І. Вдосконалення магнітної системи фрезера-уловлювача невеликого діаметра / Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України», 7-9 вересня 2012 р. : Збірник тез доповідей. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 28-29.

16. Романишин Л. І. Розроблення фрезера-уловлювача з рухомою

магнітною системою / Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ИНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2011. — Вип. 14. — С. 125-129.

17. Экспериментальные исследования характеристик магнитных систем ловильных устройств / Е. И. Крыжановский, П. Н. Райтер, Л. И. Романишин, Т. Л. Романишин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 104-106.

18. Романишин Л. І. Дослідно-промислові випробування магнітних ловильних пристроїв / Л. І. Романишин, В. В. Гладун, Т. Л. Романишин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ИНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. — Вип. 16. — С. 160-164.

19. Акопов Э. А. Очистка забоев глубоких скважин / Э. А. Акопов. – М.: Недра, 1970. – 120 с.

20. Влияние металла на забое скважины на показатели работы долот / В. С. Аванесьян, М. И. Антамонов, А. А. Босенко и др. // Бурение. – 1983. – № 4. – С. 2-3.

21. О влиянии очистки забоя на механическую скорость проходки / Г. Д. Бревдо, А. С. Дашевский, А. И. Цукалов и др. // Нефтяное хозяйство. – 1982. – № 7. – С. 15-17.

22. Смирнов В. П. Влияние качества очистки забоя скважины на показатели бурения / В. П. Смирнов, И. П. Левченко // Бурение. – 1977. – № 2. – С. 10-12.

23. Стеглянов Б. Л. К вопросу исследований динамики шламовых частиц в процессе очистки скважин / Б. Л. Стеглянов, П. И. Ибрагимова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2005. – № 12. – С. 13-15.

24. Миннахметов И. Р. Анализ работы существующих технологий очистки забоя скважин от металла / И. Р. Миннахметов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 45-53.

25. Гусман А. М. Исследование методов управления очисткой забоя бурящейся скважины / А. М. Гусман // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1999. – № 3.

26. Романишин Л. І. Проблеми очищення вибою свердловин від металу в процесі буріння та шляхи їх вирішення / Л. І. Романишин // Нафтогазова енергетика – 2011: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., 10-14 жовтня 2011 року. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – С. 3.

27. Лихущин А. М. Промысловые исследования очистки ствола наклонно направленной скважины от шлама / А. М. Лихущин // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 3. – С. 66-70.

28. Корнута В. А. Удосконалення конструкції шарошок та озброєння бурових доліт з урахуванням їх напруженого стану : дис. ... канд. технічних наук: 05.05.12 / В. А. Корнута. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. – 170 с.

29. Мислюк М. А. Буріння свердловин: довідник: у 5 т. Т. 5. Ускладнення. Аварії. Екологія / М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С. Яремійчук. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2004. – 376 с.

30. Гасанов А. П. Восстановление аварийных скважин / А. П. Гасанов. – М.: Недра, 1983. – 128 с.

31. Подгорнов М. И. Ловильный инструмент / М. И. Подгорнов, И. П. Пустовойтенко. – М.: Недра, –1984. – 148 с.

32. Пустовойтенко И. П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении / И. П. Пустовойтенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 279 с.

33. Басарыгин Ю. М. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин / Ю. М. Басарыгин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. – М.: Недра, 2000. – 679 с.

34. Ловильні роботи у свердловинах: методичний посібник / В. М. Світлицький, В. П. Троцький, С. В. Кривуля, В. І. Коцаба. – Х.: ТОВ "Оберіг", 2010. – 192 с.

35. Инструкция по классификации, расследованию и учету аварий при

бурении скважин на нефть и газ. – М.: ВНИИОЭНГ, 1979. – 26 с.

36. Щепетов О. А. Системная классификация аварий в бурении / О. А. Щепетов // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 2. – С. 36-42.

37. Яким Р. С. Науково-прикладні засади підвищення довговічності тришарошкових бурових доліт: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.12 / Я. Р. Яким. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. – 442 с.

38. Инструкция по бурению нефтяных и газовых скважин алмазными буровыми инструментами: РД 39-2-77-78. – М.: ВНИИБТ, 1979. – 45 с.

39. Landing the big one – the art of fishing / E. Johnson, J. Land, M. Lee, R. Robertson // Oilfield Review Winter 2012/2013: 24, no. 4, pp. 26-35.

40. Рибчич І. Й. Аналіз показників роботи тришарошкових доліт у буровому управлінні "Укрбургаз" / І. Й. Рибчич, М. А. Мислюк, Ю. М. Василюк // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 3. – С. 20-25.

41. Нафтова і газова промисловість. Буріння свердловин. Основні положення: СОУ 11.2-20077720-029:2009. – [Чинний від 2009-02-03]. – К.: НАК "Нафтогаз України", 2009. – 109 с.

42. Джафаров А. А. Руководство по ловильным инструментам: справочное пособие / А. А. Джафаров. – М.: Недра, 1980. – 97 с.

43. Отраслевое руководство по проведению ловильных работ при бурении нефтяных и газовых скважин: РД 39-2-1022-84. – Баку: АзНИПИнефть, 1984. – 39 с.

44. Гаврась В. А. Инструменты для очистки забоя скважины / В. А. Гаврась, В. П. Червинский // Газ. пром-сть. Сер. Бурение газ. и газоконденсатных скважин. – 1982. – № 7. – с. 12-16.

45. А. с. 1131999 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Металлоуловитель / Т. Г. Старцева, Ю. М. Гержберг. – № 3643665/22-03; заявл. 15.07.83; опубл. 30.12.84, Бюл. № 48.

46. Пат. 2004770 Российская Федерация, МПК Е21В 31/06. Ловильное устройство / Осколков А. Н. - № 4947220/03; заявл. 18.06.91; опуб.

15.12.1993, Бюл. № 45-46. – 4 с.

47. Фрезеры-ловители магнитные. Технические условия: ОСТ 26-16-1606-78.

48. А. с. 1035191 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Н. Г. Курбанов, Ю. А. Гладков, Т. Г. Бунятов и др. – № 3391566/22-03; заявл. 26.02.82; опубл. 15.08.83, Бюл. № 30.

49. А. с. 1122810 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Скважинный магнитный ловитель / К. У. Мязитов, А. А. Парсаданов, Г. П. Новиков и др. – № 3635930/22-03; заявл. 19.08.83; опубл. 07.11.84, Бюл. № 41.

50. Magneti Pentru Instrumentatie: STAS 10628-80. – Bucuresti, tiparit la 25.09.1981. – 6 р.

51. А. с. 1090846 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Ю. А. Курников, Н. Ф. Коржик, Л. И. Романишин и др. – № 3403823/22-03; заявл. 02.03.82; опубл. 07.05.84, Бюл. № 17.

52. Пат. 2194145 Российская Федерация, МПК Е21В 31/06. Гидромагнитный фрезер-ловитель / Лапин В. В., Войцеховский В. А., Семенов В. П., Соколов А. В. - № 2001113677/03; заявл. 15.05.2001; опубл. 10.12.2002, Бюл. № 45.

53. Измерон. Инструмент и оборудование для очистки скважин. Фрезеры-ловители магнитные типа ФЛМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.izmeron.ru/cat/cat06/cat06_24.html

54. Аношкин А. П. О характеристиках прямых магнитных ловителей для капитального ремонта скважин / А. П. Аношкин, С. В. Константинов // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 9. – с. 83-84

55. Константинов С. В. Новое в технологии капитального ремонта скважин / С. В. Константинов, А. П. Аношкин, В. С. Зотов // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 1. – с. 54-55.

56. Пат. 2106473 Российская Федерация, МПК Е21В 31/06. Магнитный ловитель / Мязитов К. У., Зейнанов Р. Р., Аббасов С. А. и др. - № 95116546/03; заявл. 25.09.1995; опубл. 10.03.1998, Бюл. № 8.

57. Пат. 2272888 Российская Федерация, МПК E21B 31/06. Скважинный магнитный ловитель / Санников А. Г., Сидельников Л. Г., Кокорин А. Е. - № 2004101642/03; заявл. 20.01.2004; опуб. 27.03.2006, Бюл. № 9. – 8 с.
58. А. с. 171347 СССР, МКИ E 21 B 31/06. Магнитный фрезер-паук / В. А. Серенко, И. А. Серенко, В. В. Гостев. – № 887124/22-3; заявл. 14.03.64; опуб. 26.05.65, Бюл. № 11.
59. Patent 1085834 Deutschland. Int. Kl. E21 B 31/06. Magnetische Fangvorrichtung fuer verlorenes Bohrgeraet / Samol Herbert. Anmeldetag 9 August 1958; Bekanntmachung der Anmeldung und Ausgabe der Auslegeschrift 28 Juli 1960.
60. Patent 4,059,155 United States. Int. Cl. E21 B 31/06. U.S. Cl. 166/301; 166/65 M; 166/99; 175/237. Junk basket and method of removing foreign material from a well / Tom R. Greer. Prior Publication 706,387 Jul. 19, 1976; date of Patent Nov. 22, 1977.
61. Константинов О. Я. Расчет и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений / О. Я. Константинов. – Л.: Машиностроение, 1967. – 315 с.
62. Дадашев Н. Г. К выбору оптимальных размеров магнитных ловителей / Н. Г. Дадашев, Ю. Г. Мирзоян, К. У. Мязитов // РНТС ВНИИОЭНГ сер. Машины и нефтяное оборудование. – 1975. – № 12. – с. 20-22.
63. Кобылянский М. Т. Выбор и обоснование основных функциональных критериев оценки технического уровня магнитных ловителей бурового инструмента // Вестник КузГТУ. – 2003. - № 2. – С. 15-18.
64. Зейналов Р. Р. Исследование магнитных систем буровых магнитных ловителей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. – № 7. – С. 8-10.
65. Кокорин А. Е. Магнитные ловители для ремонта нефтяных и газовых скважин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / А. Е. Кокорин. –

Екатеринбург, 2001. – 212 с.

66. Кобылянский М. Т. Магнитные ловители бурового инструмента: анализ и синтез: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / М. Т. Кобылянский. – Кемерово, 1999. – 354 с.

67. Advanced Magnetic Materials and Applications: the 2nd International Symposium on 12–16 July 2010, Sendai International Center, Sendai, Japan. – Journal of Physics: Conference Series 266 (2011).

68. Глебов В. А. Нанокристаллические редкоземельные магнитотвердые материалы / В.А. Глебов, А.А. Лукин. – М. : Изд. ВНИИНМ, 2007. – 179 с.

69. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.

70. Мишин Д. Д. Магнитные материалы: учеб. пособие / Д. Д. Мишин. – М.: Высшая школа, 1981. – 335 с.

71. Материалы магнитотвердые литые. Марки: ГОСТ 17809-72. – [Введ. 1974-01-01]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

72. Верников А. Я. Магнитные и электромагнитные приспособления в металлообработке / А. Я. Верников. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.

73. Постоянные магниты: справочник / А. Б. Альтман, Э. Е. Верниковский, А. Н. Герберг и др.; под ред. Ю. М. Пятина. – М.: Энергия, 1971. – 376 с.

74. Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры: ГОСТ 24063-80. – [Введ. 1981-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с. – (Государственный стандарт).

75. DEXTER Magnetic Technologies. Material Grades. Neodymium Iron Boron Magnets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dextermag.com/material-grades/neodymium-iron-boron-magnets>

76. TDK Neodymium-Iron-Boron Magnets. NEOREC series [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.tdk.co.jp/tefe02/e331.pdf>

77. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплавов неодима с железом и бором : Технические условия ТУ 1984-001-18785310-2003. – [Введ. 2003-30-05]. – М.: НПК "Магниты и магнитные технологии", 2003.

78. Gutfleisch O. Controlling the properties of high energy density permanent magnetic materials by different processing routes // Journal of Physics D: Appl. Phys. 33 (2000) R157–R172.

79. Магнитотвёрдые магнитные материалы [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ferrite.ru/products/magnets/>

80. Романишин Т.Л. Обґрунтування вибору постійних магнітів для ловильних пристроїв / Т. Л. Романишин // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика – 2011», 10-14 жовтня 2011 р. : Анотації. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 4.

81. А. с. 688602 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Ю. А. Курников, Г. А. Мартынов, М. Т. Кобылянский и др. – № 2617996/22-03; заявл. 17.05.78; опубл. 30.09.79, Бюл. № 36.

82. А. с. 711273 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Ю. А. Курников, М. Т. Кобылянский, Г. А. Мартынов. – № 2425847/22-03; заявл. 02.12.76; опубл. 25.01.80, Бюл. № 3.

83. А. с. 1090846 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Ю. А. Курников, Н. Ф. Коржик, Л. И. Романишин и др. – № 3403823/22-03; заявл. 02.03.82; опубл. 07.05.84, Бюл. № 17.

84. Арнольд Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.

85. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 336 с.

86. Куш І. А. Аналіз методів розрахунку магнітних полів у машинах постійного струму / І. А. Куш // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів "Електромеханічні та енергетичні

системи, методи моделювання та оптимізації", 28-29 березня 2012 р. : Збірник наукових праць. – Кременчук, КрНУ. – 2012. С. 363-364.

87. Коген-Далин В. В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами / В. В. Коген-Далин, Е. В. Комаров. – М.: Энергия, 1977. – 246 с.

88. Васьковський Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с.

89. Коген-Далин В. В. Расчет магнитных систем с редкоземельными магнитами и ненасыщенной арматурой методом интегральных уравнений / В. В. Коген-Далин, Ю. А. Коняев, П. А. Курбатов // Электричество – №7. – 1975. – с. 65-67.

90. Коген-Далин В. В. Расчет сложных систем с постоянными магнитами на основе интегральных уравнений / В. В. Коген-Далин, П. А. Курбатов // Тр. МЭИ. – Вып. 483. – 1980. – с. 75-80.

91. Курбатов П. А. Численный расчет электромагнитных полей. / П. А. Курбатов, С. А. Аринчин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

92. Численное моделирование стационарных магнитных полей магнитоэлектрических систем методом конечных и граничных элементов. / Бахвалов Ю. А., Никитенко А. Г., Гринченков В. П., Косиченко М. Ю. // Электротехника. – 1999 – №1.

93. Расчёт магнитных полей электрических машин методом конечных элементов. / Кислицын А. Л., Криштейн А. М., Солнышкин Н. И., Эрнст А. Д. – Изд-во Саратовского ун-та, 1980.

94. Копей Б. В. Використання методу скінченних елементів та тривимірного комп'ютерного моделювання для конструювання та оптимізації параметрів нафтогазового обладнання: Навчальний посібник / Б. В. Копей, В. Б. Копей. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 117 с.

95. Кивокурцев А. Ю. Математические модели и методы расчета магнитных силовых систем: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" / А. Ю. Кивокурцев. – Саратов, 2004. – 21 с.

96. Кобылянский М. Т. Расчет магнитных систем на постоянных магнитах ловителей бурового инструмента / М. Т. Кобылянский, Г. А. Мартынов // Сб. науч. тр. Кузбас. политехи, ин-т. – 1980. – № 4. – с. 156-161.

97. Клявлин А. ANSYS, INC.: Современные методы моделирования электромагнитного поля // САПР и графика. – 2011. – № 6 (176). – с. 52-55.

98. Клявлин А. Сеточный генератор ANSYS Maxwell // САПР и графика. – 2013. – № 4 (198). – с. 44-46.

99. Испытание магнитных материалов и систем / Е. В. Комаров, А. Д. Покровский, В. Г. Сергеев, А. Я. Шихин; под. ред. А. Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.

100. Сабан Т. И. Способ определение подъемной силы магнитного ловильного устройства / Т. И. Сабан, Л. И. Романишин // Нефтяная и газовая промышленность. – 1988. - № 2. – с. 29-31.

101. Сергеев В. Г. Магнитоизмерительные приборы и установки / В. Г. Сергеев, А. Я. Шихин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 152 с.

102. Февралева М. Е. Магнитотвердые материалы и постоянные магниты. Определение характеристик: справочник. – Киев: Наукова думка, 1969. – 232 с.

103. А. с. 1583896 СССР, МКИ Е 21 В 31/06. Способ определения грузо-подъемной силы постоянного магнита / И. Ю. Мотрук, Т. И. Сабан, Ю. А. Курников и др. – № 4340374/23-03; заявл. 08.12.87; опубл. 07.08.90, Бюл. № 29.

104. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб: ГОСТ 28840-90. – [Введ. 1990-29-12]. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 12 с. – (Государственный стандарт).

105. Кобылянский М. Т. Анализ влияния неблагоприятных скважинных факторов на параметры магнитных ловителей бурового инструмента // Вестник КузГТУ. – 2009. - № 6. – С. 14-16.

106. Повышение стойкости опор шарошечных долот при бурении глубоких скважин / А. И. Ямалтдинов, М. Р. Мавлютов, А. И. Спивак, Г. В.

Конесев // Обз. инфор. ВНИИОЭНГ, сер. Бурение. – 1986. - № 3. – с. 22-29.

107. Ганджумян Р. А. Конструктивные особенности и характеристики устройств для защиты бурового инструмента от вибраций за рубежом // Обз. инфор. ВНИИОЭНГ, сер. Машины и нефтяное оборудование. – 1986. - № 1. – с. 2-6.

108. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наукова думка, 1984. – 288 с.

109. Фрезеры-ловителя магнитные. Технические условия: ТУ 3668-023-40701250-2008. – [Чинний від 12.12.2008].

110. Миронов Ю. В., Шмидт А. П. Определение технического уровня комплектных буровых установок по комплексу единичных показателей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999. - № 12. – с. 9-11.

111. НПК Магниты и магнитные системы. Магнитные системы фрезеров-ловителей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.magn-ms.ru/products/general.html>

112. Крижанівський Є. І. Розроблення і впровадження ловильних пристроїв на базі систем із високоенергетичних магнітів / Є. І. Крижанівський, Л. І. Романишин, Т. Л. Романишин // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2013», 7-11 жовтня 2013 р. : Тези доповідей. – Івано-Франківськ. – 2013. – С. 92-96.

113. Пат. 32318 Україна, МПК E21B 31/06. Металоуловлювач магнітний / Романишин Л. І., Атаманчук І. С., Лях М. М., Євчук Л. В., Романишин Т. Л.; патентовласник ІФНТУНГ. – u2008 00298; заявл. 08.01.2008; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9. – 4 с.

114. Романишин Л. І. Розроблення пристроїв на постійних магнітах для очищення вибоїв свердловин від металу при бурінні / Л.І. Романишин, Т.Л. Романишин // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ИНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2010. — Вип. 13. — С. 122-126.

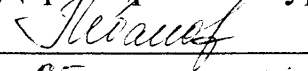
ДОДАТКИ

Додаток А

Акти промислових випробувань магнітних ловильних пристроїв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Бурінтехсервіс»


 Р.В.Леванов
 «05» листопада 2012 р.
АКТ
**промислових випробувань
 пристрою магнітного ловильного ПМЛ**
1 Об'єкт і мета випробувань

Промислові випробування пристрою магнітного ловильного ПМЛ-275, розробленого на рідкоземельних постійних магнітах сплаву неодим-залізо-бор в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (Крижанівський Є.І., Романишин Л.І., Романишин Т.Л. Уловлювач магнітний. Патент на винахід UA № 99790 МПК E21B 31/06) за участі аспіранта кафедри нафтогазового обладнання Романишина Т.Л., проводилися з метою визначення ефективності роботи при очищенні вибою свердловини від металу.

2 Місце і умови випробувань

ТОВ «Бурінтехсервіс».

Свердловина №53, Свиридівської площі.

3 Бурове обладнання та інструмент

Бурова установка «Уралмаш 3Д-76».

Магнітний ловильний пристрій ПМЛ-275.

Характеристика свердловини

- 1 Глибина вибою, м - 4123
- 2 Діаметр долота, мм – 295,3
- 3 Густина промивальної рідини, кг/м³ - 1240
- 4 Тиск на вибої, МПа - 51
- 5 Температура на вибої, °С – 102

Режим роботи

- 1 Осьове навантаження, кН – 5-10
- 2 Продуктивність насоса, л/с - 23
- 3 Частота обертання пристрою, хв⁻¹ -20-40

4 Короткий опис аварійних робіт: 30 червня 2012 року при бурінні свердловини №53 Свиридівської площі внаслідок розгерметизації та руйнування опори долота III-295,3 REED R15A, код IADC 447, серія №P92360 на вибої залишилася шарошка та тіла кочення опори.

З метою ліквідації аварії було прийнято рішення опустити у свердловину бурильний інструмент наступної компоновки: пристрій

магнітний ловильний ПМЛ- 275 – 0.54м; перехідник КЗ-152хМЗ-133 – 0.51м; перехідник КЗ-133хМЗ-163 – 0.51м; ОБТ-203-148, 29м; перехідник КЗ-163хМЗ-147 – 0.5м; бурильні труби ТБПК – 140 – 148, 84м; перехідник КЗ-147хМЗ-133 – 0.48м; бурильні труби ТБПК – 127 – 3644, 95м; перехідник КЗ-133хМЗ-147 – 0.5м; бурильні труби ТБПК – 140 – 73, 88м.

5 Результати випробувань

Таблиця 1 - Результати випробувань

Площа, № свердловини	Глибина вибою, м	Стан вибою	Кількість СПО ПМЛ	Час СПО (час роботи на вибої), годин	Маса піднятого металу, кг
Свирідівська, №53	4123	Залишена 1 шарошка долота III 295,3 МЗ-ГАУ, тіла кочення опори долота	1	СПО – 17 Ловильні роботи – 0.35	9.2

Після підйому бурильної колони на робочій поверхні магнітного ловильного пристрою виявлена шарошка долота, захоплена магнітною системою за вершину і твердосплавне озброєння та тіла кочення опори долота.

6 Висновки і рекомендації

Пристрій магнітний ловильний ПМЛ підтвердив свою працездатність і ефективність при ліквідації аварії з породоруйнівним інструментом, що виникла при бурінні свердловини.

Пристрій ПМЛ володіє високою вантажопідйомною силою, що забезпечує очищення вибою свердловини від аварійних предметів і твердосплавного озброєння доліт за один рейс.

Економічний ефект за рахунок зменшення витрат часу на очищення вибою свердловин від аварійних предметів з використанням пристрою ПМЛ складає 4 10 тис. грн.

Головний інженер



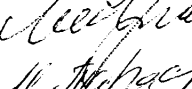
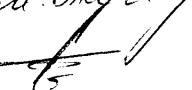


Начальник технічного відділу

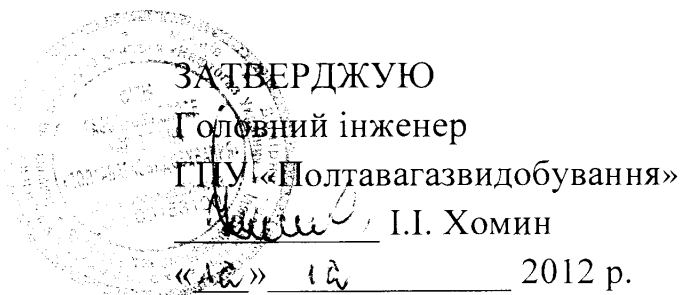
Майстер зі складних робіт

Представник «Регал Петроліум»

Доцент кафедри НГО

Асистент кафедри НГО

 О.В. Берюк
 В.В. Кожокар
 Ю.В. Левоско
 М.М. Тарасенко
 Л.І. Романишин
 Т.Л. Романишин



АКТ
промислових випробувань
фрезерів-уловлювачів магнітних ФУМ

1 Об'єкт випробувань.

Фрезери-уловлювачів з рухомою магнітною системою ФУМ-112, ФУМ-136 розроблені в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (патент на винахід UA № 100087 МПК E21B 31/06) за участі аспіранта кафедри нафтогазового обладнання Романишина Т.Л.

2 Мета випробувань.

Визначення працездатності фрезерів-уловлювачів в умовах експлуатації та порівняння ефективності їх роботи при аварійно-відновлювальних роботах у свердловинах.

3 Місце і умови випробувань.

ГІУ «Полтавагазвидобування», свердловини № 60 Матвіївського ГКР та № 100 Західно-Солохівського ГКР.

Характеристика свердловин

Геолого-технічні дані	Свердловини	
	№ 60 Матвіївського ГКР	№ 100 Західно- Солохівського ГКР
1 Глибина, м	3961	4898
2 Діаметр експлуатаційної колони, мм	168	146
3 Промивальна рідина	пластова вода $\rho=1040 \text{ кг/м}^3$	
4 Пластовий тиск, МПа	3,46	15
5 Температура на вибої, °С	112	117,5
6 Тип флюїду	газ	

4 Обладнання та інструмент.

Мобільні установки для буріння, ремонту та обслуговування свердловин TW-80, IRI-125.

Експериментальні зразки фрезерів-уловлювачів з рухомою магнітною системою ФУМ-112 та ФУМ-136, пристрій магнітний УОЗ-136.

5 Результати випробувань.

5.1 При капітальному ремонті свердловини № 60 Матвіївського ГКР у грудні 2011 року обірвалися НКТ діаметрами 60,3 мм, 73 мм на глибині 3182 м. Для ліквідації аварії використовувалися колоколи, мітчики, труболовки, торцеві і кільцеві фрезери. Під час фрезерувальних робіт на верхній частині аварійних труб накопичувалися металеві частинки, що не виносилися із свердловини промивальною рідиною і перешкоджали подальшому проведенню аварійно-відновлювальних робіт.

З метою видалення із свердловини аварійного металу періодично, по мірі накопичення металевих частин, проведені дві спуско-підйомні операції з використанням пристрою УОЗ та фрезера - уловлювача з рухомою магнітною системою ФУМ-136. Режим роботи експериментальних зразків відповідав програмі та методиці експлуатаційних випробувань ФУМ - 00. 00. 000 ПМ-1. Час роботи на вибої – по 0,5 години.

Після підйому пристрою магнітного УОЗ-136 на його робочій поверхні виявлено металеві частинки у вигляді великозернистого металевого порошку і кусочків стружки масою 3,2 кг. Друга операція по очищенні свердловини проводилася за допомогою фрезера-уловлювача ФУМ-136, при цьому були вилучені дрібні частини насосно-компресорних труб та твердосплавне озброєння торцевих фрезерів масою 6,8 кг. Осьове переміщення магнітної системи при цьому складало 50 мм. Робоча поверхня системи не пошкоджена. Частково зношена ріжуча частина фрезера.

5.2 При виконанні аварійних робіт у свердловині № 100 Західно-Солохівського ГКР у січні 2012 року на глибині 4583 м було прихоплено 114 м бурильних труб діаметром 73 мм з кільцевим фрезером діаметром 114 мм. Ловильні роботи колоколами, мітчиками, труболовками, калібрами результатів не дали. Під час фрезерувальних робіт кільцевими та торцевими фрезерами на верхній частині обірваної бурильної колони накопичувалися не винесені промивною рідиною продукти взаємного руйнування фрезерів і труб, що перешкоджало подальшому фрезеруванню бурильних труб та знижувало ефективність роботи фрезерів.

З метою очищення верхньої частини аварійного інструменту від металевих частин був проведений спуск фрезера – уловлювача з рухомою магнітною системою ФУМ-112. Режим роботи фрезера-уловлювача відповідав настанові з експлуатації та програмі і методиці промислових випробувань ФУМ-00.000 ПМ. Після підйому було виявлено переміщення магнітної системи на 210 мм, яке викликано захопленням частини (довжиною 223 мм) зруйнованої бурильної труби. Загальна маса вилученого із свердловини металу і твердого сплаву – 8,2 кг. Зношення робочої поверхні не виявлено.

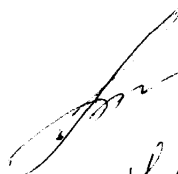
6 Висновки і рекомендації.

Фрезери-уловлювачі з рухомою магнітною системою підтвердили свою працездатність при аварійно-відновлювальних роботах у глибоких експлуатаційних свердловинах.

У порівнянні із пристроями УОЗ фрезери на рідкоземельних магнітах ФУМ дозволили вилучити із свердловини у два рази більшу кількість металу, у тому числі твердого сплаву.

При виконанні фрезерувальних робіт у свердловинах доцільно використовувати фрезери – уловлювачі з рухомою магнітною системою ФУМ, що призведе до зменшення витрат часу на ліквідацію аварій, підвищення ефективності роботи та економії кільцевих і торцевих фрезерів.

Начальник цеху КРС



С.А. Бабій

Провідний геолог ЦКРС



В.І. Бойко

Доцент кафедри нафтогазового

обладнання ІФНТУНГ



Л.І. Романишин

Асистент кафедри НГО ІФНТУНГ



Т.Л. Романишин

ЗАТВЕРДЖЕНО
Головний інженер
Державного підприємства
«Львівське управління
геофізичних робіт»
О.О. Волинський
2012 р.

АКТ

впровадження у виробництво уловлювачів магнітних ловильних УМЛ-88, УМЛ-115

1 Об'єкт впровадження

Уловлювачі магнітні ловильні УМЛ-88, УМЛ-115, розроблені в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (Крижанівський Є.І., Романишин Л.І., Романишин Т.Л. Уловлювач магнітний, патент на винахід UA № 99790 МПК E21B 31/06).

2 Мета випробувань і впровадження

Визначення працездатності уловлювачів магнітних в свердловинних умовах експлуатації та оцінка ефективності їх роботи при аварійно-відновлювальних роботах у свердловинах.

3 Місце і умови випробувань (див. табл. 1)

4 Обладнання та інструмент

Мобільні каротажні підйомники ПКС-5; ПКС-3,5; ПKN-3,5.
Уловлювачі магнітні ловильні УМЛ-88; УМЛ-115.

5 Результати випробувань

5.1 При капітальному ремонті свердловини № 75 Котелевського ГKR у листопаді 2011 року обірвалися НКТ діаметром 73 мм на глибині 3657 м. Для ліквідації аварії використовувалися колоколи, мітчики, торцеві і кільцеві фрезери. Під час фрезерувальних робіт на верхній частині аварійних труб накопичувалися металеві частинки, що не виносилися із свердловини промивальною рідиною і перешкоджали подальшому проведенню аварійно-відновлювальних робіт.

З метою вилучення із свердловини аварійного металу періодично, по мірі накопичення металевих частин проведено сім спуско-підйомних операцій на геофізичному кабелі з використанням уловлювача УМЛ-115. Роботи виконувалися згідно плану робіт. Після кожного підйому уловлювача магнітного УМЛ-115 на його робочій поверхні виявлено металеві частинки у вигляді кусочків стружки, дрібні частини насосно-компресорних труб, металевого порошку та твердосплавні частинки торцевих фрезерів, приблизно по 1-2 кг за СПО. Робоча поверхня уловлювача не пошкоджена.

5.2 При виконанні аварійних робіт у свердловині № 67 Матвіївського ГКР у березні 2012 року на глибині 3510 м було прихоплено НКТ-73. Після відстрілу прихопленої частини НКТ, ловильні роботи колоколами, мітчиками результатів не дали. Під час фрезерувальних робіт кільцевими та торцевими фрезерами на верхній частині залишених НКТ накопичувалися невинесені промивною рідиною продукти руйнування труб, які перешкождали подальшому фрезеруванню НКТ та знижували ефективність роботи фрезерів.

З метою очищення верхньої частини аварійного НКТ від металевих частинок було виконано 4 спуски на кабелі уловлювача УМЛ-115. Роботи виконувалися згідно плану робіт. При перших 3-х спусках були підняті дрібні частинки НКТ та стружка загальною масою 4 кг. За четвертий спуск була піднята завалькована всередину муфта НКТ (масою 4,5 кг) відірвана від труби, яка оберталася разом із фрезером і не дозволяла далі фрезерувати НКТ. Робоча поверхня уловлювача не ушкоджена.

5.3 При капітальному ремонті свердловини № 1 Луценківської площі впав у свердловину клин ротора розміром 80x150 мм, а також утримує клин кільце, які зупинилися на глибині 59 метрів. В червні 2011 р. за декілька спроб клин і кільце були підняті на поверхню за допомогою уловлювача УМЛ-115, спущеного у свердловину на кабелі.

5.4 При розбурюванні цементного моста у свердловині № 57 Скоробагатьківського ГКР в листопаді 2011 р. на глибині 4091 м залишилися шарошки долота. За 4 спуско-підйомні операції всі три шарошки масою по 1 кг були підняті на поверхню за допомогою уловлювача УМЛ-88, спущеного у свердловину на геофізичному кабелі.

5.5 При капітальному ремонті свердловини № 21 Козіївського НГКР в червні 2012 р. НКТ-73 не проходили у свердловину нижче 2502 м. За допомогою уловлювача УМЛ-115, спущеного на кабелі, із свердловини був піднятий металевий предмет (пластина)-розмірами 3x60x500 мм, масою 2,5 кг.

5.6 В кінці 2011 року при капітальному ремонті свердловини № 1 Шкурупіївської площі уловлювачем УМЛ-88 за п'ять спуско-підйомних операцій з глибини 3403 м було піднято на поверхню залишки розбуреного фрезерами долота масою до 7 кг, що дозволило в подальшому розбурити цементний міст.

5.7 В липні 2012 року при капітальному ремонті свердловини № 52 Матвіївського ГКР при фрезеруванні залишеного НКТ-73 з глибини 2965 м, періодично, після чергового фрезерування із свердловини підіймалися дрібні частини НКТ, стружка та великозернистий металевий порошок. Всього виконано біля 30 спуско-підйомних операцій на кабелі уловлювача УМЛ-115 і піднято на поверхню металевих осколків масою біля 10 кг.

6 Висновки і рекомендації

Уловлювачі магнітні ловильні УМЛ-88, УМЛ-115 підтвердили свою працездатність при високу ефективність при аварійно-відновлювальних роботах у глибоких експлуатаційних свердловинах. При виконанні аварійних робіт доцільно використовувати уловлювачі магнітні, які спускаються на геофізичному кабелі, що дозволяє на порядок скоротити тривалість спуско-підйомних операцій, зменшити час простою свердловини при ліквідації аварій, підвищити ймовірність підйому більшої кількості металевих частинок із свердловини, які перешкоджають ліквідації аварій. Прогнозований економічний ефект від використання уловлювачів магнітних ловильних УМЛ в ДП «Полтавське УГР» у 2011-2012 роках складає близько 950 тис. грн. (дев'ятсот п'ятдесят тисяч гривень).

Заступник директора з виробництва
ДП «Полтавське УГР»

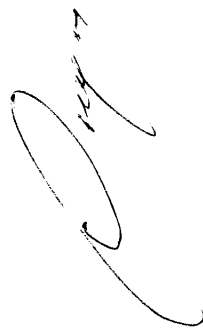
С. М. Януш

Начальник служби СРА

О. В. Данчук

Таблиця 1. – Характеристика свердловин

Геолого-технічні дані	Свердловина							
	№ 75 Котелевського ГКР	№ 67 Матвіївського ГКР	№ 1 Луценківська площа	№ 57 Скоробагатківського ГКР	№ 21 Козіївського НГКР	№ 1 Шкурупіївська площа	№ 52 Матвіївського ГКР	
Глибина, м	3657	3510	59	4091	2505	3403	2965	
Діаметр експлуатаційної колони, мм	146	146	168	146	146	146	146	
Промивна рідина	Технічна вода	Технічна вода	Технічна вода	Технічна вода	Технічна вода	Технічна вода	Технічна вода	
Пластовий тиск, МПа	37,0	35,5	0,5	42,0	25,5	35,0	30,3	
Температура на вибої, °С	91	86	-	102	64	75	78	
Тип флюїду	Газ	Газ	-	Газ	Нафта-газ	Газ	Газ	
Швидкість спуску та підйому УМЛ, м/год	3500	3500	4500	4500	3500	4800	3500	



ОТЗЫВ

об эксплуатации фрезеров-ловителей магнитных типа ФУМ
на скважине "Genčiai-14 (LOTOSGeonafta, Литва)

Фрезеры-ловители магнитные типа ФУМ наружным диаметром 88, 116, 146 и 270 мм, разработанные в Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа (патент на изобретение UA №99790 МПК E 21 B 31/06) и изготовлены в ООО НТФ "Интербур ЛТД" (Украина) нашим предприятием эксплуатируются с 2010 г.

По итогам их эксплуатации можно сделать следующие выводы:

1 Фрезеры-ловители магнитные типа ФУМ обладают повышенной грузоподъемной силой по сравнению с аналогичными магнитными ловушками производства США, Германии, России.

2 Фрезеры-ловители магнитные особенно эффективны при ликвидации аварий с породоразрушающим инструментом, очистке забоя скважин от металлических предметов, обладающих ферромагнитными свойствами, а также твердосплавного вооружения буровых долот.

3 Ловильные работы, проведенные фрезером-ловителем магнитным диаметром 88 мм, позволили за 3 рейса извлечь из забоя скважины глубиной 2121 м, 5,2 кг металла. Другим ловильным инструментом извлечь металл из скважины без предварительного его разрушения было невозможно.

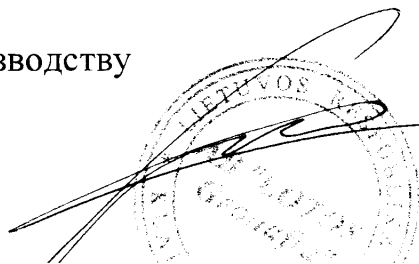
4 Использование фрезеров-ловителей магнитных типа ФУМ при ликвидации аварий и очистке скважин от металла позволяет сократить время на проведение ловильных работ, улучшить качество очистки забоя скважин, повысить показатели работы буровых долот.

Таким образом, фрезеры-ловители магнитные типа ФУМ (Украина) могут быть рекомендованы для проведения ловильных и аварийно-восстановительных работ при бурении и ремонте нефтяных и газовых скважин. Их наличие на буровых и нефтегазодобывающих предприятиях обязательно.

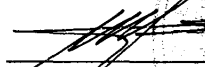
Директор по производству
LOTOSGeonafta

Гедеминас Валантинас

16.04.2013 г.




Додаток Б

"ЗАТВЕРДЖУЮ"Проректор з науково-педагогічної
роботи ІФНТУНГ
Мандрик О. М.
"28" 11 2014 р.**АКТ**впровадження в навчальний процес
результатів дисертаційної роботи Романишина Т. Л.

В результаті виконання асистентом кафедри нафтогазового обладнання Романишином Т. Л. дисертаційної роботи на тему "Підвищення ефективності очищення вибоїв нафтогазових свердловин пристроями на основі постійних магнітів" одержані нові наукові та прикладні результати, які активно використовуються в навчальному процесі на кафедрі "Нафтогазового обладнання" під час проведення занять з дисципліни "Машини та обладнання для видобутку нафти і газу", а також при підготовці спеціалістів та магістрів (науково-дослідна робота, курсове і дипломне проектування).

Зокрема, розроблена та поставлена лабораторна робота "Вивчення конструкцій та експлуатаційних параметрів інструменту для аварійно-ловильних робіт", для виконання якої виготовлений стенд та розроблена методика дослідження силових характеристик магнітних систем ловильних пристроїв.

Заст. директора інституту
інженерної механіки
Долішній Б. В.В. о. зав. кафедри
нафтогазового обладнання
Костриба І. В.