

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ ДЛЯ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Т.Л. Романишин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353,
e-mail: tarasromanushin@gmail.com

Описано умови експлуатації ловильного інструменту, визначено чинники, які впливають на стабільність магнітних параметрів пристроїв, встановлено вимоги до їх магнітних систем. Проведено порівняльний аналіз характеристик основних класів сучасних магнітотвердих матеріалів, визначено ефективну область їх застосування у магнітних ловильних пристроях залежно від умов експлуатації. Встановлено критерії та обґрунтований вибір раціонального різновиду постійних магнітів для систем уловлювачів. Наведено криві розмагнічування рідкоземельних магнітів системи неодим-залізо-бор марок N48, N42SH та феритових магнітів марки 28BA190. Показано вплив температури на характеристики магнітних матеріалів. Проведено розрахунок магнітних полів елементарних систем із рідкоземельними і феритовими магнітами методом скінченних елементів. Обґрунтовано доцільність використання високоенергетичних магнітів у системах ловильних пристроїв.

Ключові слова: крива розмагнічування, магнітна індукція, магнітна система, рідкоземельний матеріал.

Описаны условия эксплуатации ловильного инструмента, определены факторы, влияющие на стабильность магнитных параметров устройств, установлены требования к их магнитным системам. Проведен сравнительный анализ характеристик основных классов современных магнитотвердых материалов, определена эффективная область их применения в магнитных ловильных устройствах в зависимости от условий эксплуатации. Установлены критерии и обоснованный выбор рационального вида постоянных магнитов для систем ловителей. Приведены кривые размагничивания редкоземельных магнитов системы неодим-железо-бор марок N48, N42SH и ферритовых магнитов марки 28BA190. Показано влияние температуры на характеристики магнитных материалов. Проведен расчет магнитных полей элементарных систем изредкоземельными и ферритовыми магнитами методом конечных элементов. Обоснована целесообразность использования высокоэнергетических магнитов в системах ловильных устройств.

Ключевые слова: кривая размагничивания, магнитная индукция, магнитная система, редкоземельный материал.

Operation conditions for magnetic fishing tool are described; factors affecting the stability of the magnetic device parameters are identified; requirements for their magnetic systems are established. A comparative analysis of the main classes of modern hard-magnetic materials characteristics is conducted. Effective range of application magnetic materials in magnetic fishing devices is determined, with operation conditions in view. Selection criteria are determined, based on which the choice of the appropriate type of permanent magnets to be used in magnetic fishing tool systems is proven. Demagnetization curves of rare-earth neodymium iron boron magnets of grades N48, N42SH and ferrite magnets of grade 28BA190 are presented. The action of temperature on the characteristics of the magnetic materials is established. Finite element method based calculation of the magnetic fields of elementary systems with rare-earth and ferrite magnets are presented. Applicability of high-energy magnets in magnetic fishing tools systems is validated.

Keywords: demagnetization curve, magnetic flux density, magnetic system, rare-earth material.

Процес спорудження нафтогазових свердловин супроводжується періодичними відмовами та поломками бурового інструменту, в результаті чого на вибої залишаються різні за формою і масою металеві уламки [1, 2]. Одним із найбільш ефективних способів очищення вибоїв свердловин від стороннього металу є застосування магнітних ловильних пристроїв, які уловлюють феромагнітні предмети без їх попереднього руйнування.

Магнітний ловильний пристрій призначений для роботи у свердловинах в умовах високих гідростатичних тисків (до 100 МПа), температур (до 520 К), вібрацій, ударів, агресивного феромагнітного середовища та високої зашламованості металевими уламками [3]. Складні умови експлуатації пристрою вимагають створення такої конструкції, яка б володіла високими силовими і магнітними характеристиками у важких свердловинних умовах та відповідала наступним вимогам:

– магнітна система повинна володіти максимально можливою вантажопідйомною силою (максимальне значення питомої вантажопідйомної сили може досягати 234 Н/см² [3]) і бути стійкою до дії розмагнічуючих чинників;

– конструкція магнітної системи повинна бути достатньо міцною та корозійностійкою до дії агресивного середовища, забезпечувати мінімальне розсіювання магнітного поля;

– магнітні ловильні пристрої повинні якісно і з мінімальними витратами часу очищувати вибої свердловини від металевих предметів, що володіють магнітними властивостями, не залежно від їх геометричної форми.

Важливу роль на етапі конструювання магнітної системи відіграє вибір матеріалу для постійних магнітів. Постійні магніти – це попередньо намагнічені тіла із магнітного матеріалу, що володіють значною залишковою індукцією та є джерелами постійних магнітних полів. Магнітотверді матеріали – матеріали для

Таблиця 1 – Значення магнітних параметрів сплавів альніко [5]

Марка сплаву	Залишкова магнітна індукція B_r ,		Коерцитивна сила за індукцією H_{cb} ,		Максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$,	
	кГс	Тл	кЕ	кА/м	МГсЕ	кДж/м ³
ЮНДК24	12,3	1,23	0,55	44	4,0	32
ЮН15ДК24	11,5	1,15	0,65	52	4,6	36
ЮН14ДК24Т2	11	1,1	0,75	60	3,7	30
ЮН14ДК25БА	12,8	1,28	0,77	62	6,6	56
ЮНДК31Т3БА	11,5	1,15	1,15	92	8	64
ЮНДК35Т5БА	10,5	1,05	1,4	110	10	80

Примітки: 1. Значення магнітних величин наведені в системах СГСМ та СІ.
2. У сплавів ЮНДК величина коерцитивної сили за індукцією H_{cb} практично не відрізняється від значення коерцитивної сили за намагніченістю H_{cj} , тому вказується тільки величина H_{cb} .

постійних магнітів, в яких значення коерцитивної сили $H_c > 4$ кА/м [4].

Критерії вибору матеріалу постійних магнітів для систем ловильних пристроїв можна сформулювати так:

- можливість створення максимального магнітного поля за мінімальних розмірів системи;
- стійкість до дії підвищеної і пониженої температур, зовнішніх магнітних полів та інших розмагнічуючих чинників;
- простота у виготовленні та невисока вартість.

Питаннями вибору постійних магнітів для магнітних систем ловильних пристроїв займалися такі науковці, як Червінський В.П., Гаврась В.А., Курніков Ю.А., Кобилянський М.Т., Романишин Л.І. Але з часу їх досліджень відбулися значні зміни в технології виготовлення магнітотвердих матеріалів, що значно здешивили постійні магніти та дозволили знайти їх широке використання, в тому числі і в системах ловильних пристроїв. З'являються нові марки постійних магнітів із значно кращими характеристиками, проводяться дослідження з розроблення нанокompозитних магнітних матеріалів. Тому основна увага в даній статті приділена властивостям сучасних матеріалів, а також доцільності їх використання в магнітних системах ловильних пристроїв.

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

- магнітотверді матеріали системи ЮНДК (альніко);
- магнітотверді ферити;
- рідкоземельні магнітотверді матеріали;
- композиційні магнітотверді матеріали.

Найбільш важливими характеристиками магнітотвердих матеріалів є коерцитивна сила H_c , залишкова магнітна індукція B_r , робоча температура T_p , а також максимальний енерге-

тичний добуток $(BH)_{max}$, який визначає магнітну енергію W_{max} . Чим вища магнітна енергія, тим менше потрібно об'єму магнітотвердого матеріалу для створення максимального значення магнітного поля в робочому зорі.

В тридцяті роки ХХ ст. були розроблені сплави альніко, що дало можливість розширити область застосування постійних магнітів у вантажопідйомних пристроях. Їх виготовляють литтям або спіканням із сплавів алюмінію, нікелю і кобальту з додаванням різноманітних хімічних елементів (мідь, ніобій, кремній, титан). Магнітні характеристики сплавів альніко, що використовуються у свердловинних ловильних пристроях наведено в таблиці 1.

Основні переваги альніко – це достатня механічна міцність, високе значення залишкової магнітної індукції B_r , стабільність магнітних властивостей в широкому діапазоні температур. Магніти альніко найбільш термостабільні серед всіх видів магнітів і можуть використовуватися без значної втрати властивостей при температурі до 500-600 °С. Це дало можливість створити на їх основі в СРСР, США та інших країнах магнітні ловильні пристрої для очищення свердловин від металу.

Так у 1971 році в АзНМаш (Азербайджан) були розроблені магнітні фрезери на постійних магнітах із сплаву ЮНДК24 шести типорозмірів від 145 мм до 394 мм. Вантажопідйомна сила ловильних пристроїв знаходилась в межах від 0,5 кН до 1,8 кН. Створення нових магнітних матеріалів з кращими характеристиками, а також якісні зміни в конструкції дозволили освоїти з 1976 року серійний випуск магнітних фрезерів за ОСТ 26-16-1606-76 діаметрами від 86 мм до 315 мм з вантажопідйомною силою від 0,4 кН до 12 кН [6].

Один із світових лідерів по виробництву ловильних інструментів – американська компанія "Bowen" (з 2000 року входить до складу "National Oilwell Varco") також використовує постійні литі магніти у магнітних пристроях. Вантажопідйомна сила уловлювачів діаметрами

Таблиця 2 – Магнітні параметри магнітотвердих феритів [9]

Марка фериту	Залишкова магнітна індукція B_r ,		Коерцитивна сила за індукцією H_{CB} ,		Коерцитивна сила за намагніченістю H_{cJ} ,		Максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$,	
	кГс	Тл	кЕ	кА/м	кЕ	кА/м	МГсЕ	кДж/м ³
18БА220	3,3	0,33	2,64	210	2,76	220	2,26	18
22БА220	3,6	0,36	2,7	215	2,76	220	2,76	22
24БА210	3,7	0,37	2,57	205	2,64	210	3,02	24
28БА190	3,8	0,38	2,32	185	2,38	190	3,52	28
22РА220	3,6	0,36	2,7	215	2,76	220	2,76	22
24РА230	3,6	0,36	2,76	220	2,89	230	3,02	24
25РА170	3,8	0,38	1,82	145	1,88	150	3,14	25
29РА240	4	0,4	2,92	232	3,02	240	3,64	29
21СА320	3,4	0,34	3,02	240	4,02	320	2,64	21
24СА190	3,7	0,37	2,32	185	2,38	190	3,02	24
28СА250	3,9	0,39	3,02	240	3,14	250	3,52	28
10КА165	2,3	0,23	1,8	143	2,07	165	1,25	10
11КА135	2,4	0,24	1,59	127	1,69	135	1,38	11
14КА135	2,8	0,28	1,59	127	1,69	135	1,76	14

Примітка. Літери в позначеннях означають: БА – ферит барію анізотропний; РА – ферит змішаний, барієво-стронцієвий, анізотропний; СА – ферит стронцію анізотропний; КА – ферит кобальту анізотропний.

від 3¹/₄ дюймів (82,5 мм) до 19 дюймів (482,6 мм) складає відповідно від 0,86 кН до 23 кН [7].

Незначна вантажопідйомна сила уловлювачів пояснюється низьким значенням енергетичного добутку $(BH)_{max}$ сплавів альніко, максимальне значення якого становить 80 кДж/м³ та значними потоками розсіювання. Крім цього, у литих магнітів є ще один недолік – низька коерцитивна сила, що призводить до втрати їх магнітних і силових характеристик під час експлуатації та зберігання. Тому магнітні системи з магнітами цього класу повинні намагнічуватися в зібраному стані, також необхідно періодично відновлювати їх властивості при експлуатації.

Тобто, єдиною можливою конструкцією магнітної системи з використанням магнітів із сплавів альніко може бути високий феромагнітний стакан з циліндричними магнітами всередині. При оптимальних розмірах такої системи питома вантажопідйомна сила знаходиться в межах 60-65 Н/см² при максимально можливому значенні 234 Н/см² [8]. Це означає, що використовувати литі магніти в системах ловильних пристроїв неефективно.

Наступний клас магнітних матеріалів – магнітотверді ферити. Практичне застосування знайшли ферити барію та стронцію з гексагональною кристалічною структурою та ферити кобальту з кубічною структурою. Внаслідок феримагнетизму ці з'єднання володіють низькою індукцією насичення, проте висока кристаліграфічна анізотропія дозволяє отримати високу коерцитивну силу. Завдяки високій коерцитивній силі феритові магніти стійкі до розмагнічування, що дає можливість намагнічувати

їх окремо до збирання системи без погіршення параметрів. Це дозволяє, на відміну від магнітів альніко, розробляти будь-які конфігурації магнітних систем.

Феритові магніти характеризуються високою корозійною і структурною стабільністю, екологічно безпечні і можуть використовуватися практично без обмежень в часі. Вони зберігають свої основні магнітні параметри при експлуатації протягом не менше 25 років, при цьому зміні залишкової індукції, коерцитивної сили за індукцією та намагніченістю, магнітної енергії не повинні перевищувати 0,5 % [9]. Статичні та динамічні навантаження не викликають жодних змін магнітних характеристик аж до руйнування магнітів. Магнітні системи на феритових магнітах працюють при температурах до 300 °С без втрати властивостей.

Марки та властивості феритів барію і стронцію визначаються і контролюються згідно ГОСТ 24063-80 “Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры” та ОСТ 11 707.023-81 “Ферриты магнитотвердые прецизионные. Марки и основные параметры”.

В таблиці 2 наведено основні магнітні параметри магнітотвердих феритів деяких марок.

Недоліком феритових магнітів є суттєва залежність коерцитивної сили від температури, що обмежує використання цих магнітів при значних від'ємних температурах. Ферити крихкі, володіють великою твердістю та недостатньою міцністю. Крім того, внаслідок пористої структури феритових магнітів, їх потрібно оберегти від потрапляння в пори вологи та її замерзання.

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

Низькі значення залишкової індукції феритів зумовлюють особливості конструкції силових магнітних систем з концентраторами магнітного потоку. Це дозволяє створювати в робочому зазорі магнітну індукцію значно більшу, ніж у системах на литих магнітах. Тому вантажопідйомна 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 дорогі метали (через високу вартість вони не знайшли застосування) та матеріали з високою константою магнітокристалічної анізотропії – так звані рідкоземельні магнітотверді матеріали.

Рідкоземельні магніти – це магніти, що виготовляються з додаванням елементів лантаноїдної групи. Найчастіше використовуються при 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 (SmCo) та неодим-залізо-бор (Nd-Fe-B).

Промислове виробництво магнітів із сплаву SmCo розпочалося в 1980-х роках. За поєднанням магнітних властивостей вони значно перевищують феритові матеріали. Так, самарієві магніти мають залишкову магнітну індукцію B_r до 1,15 Тл, коерцитивну силу H_{CB} в межах 460-800 кА/м, енергетичний добуток $(BH)_{max}$ матеріалів сполуки SmCo₅ досягає 190 кДж/м³, а сполуки Sm₂Co₁₇ – 260 кДж/м³. Перевагами самарієвих магнітів також є відмінна корозійна стійкість, стабільність магнітних параметрів за температур до 350 °С. Певний час конкурентів за магнітними властивостями в рідкоземельних магнітів SmCo не було. Перешкодою до широкого використання сплавів самарій-кобальт у магнітних системах уловлювачів є їх висока вартість, яка, однак, в міру вдосконалення технології виготовлення постійних магнітів постійно зменшується.

На сьогоднішній день, найвищими магнітними параметрами володіють спечені рідкоземельні магніти сплаву Nd₂Fe₁₄B. Залишкова магнітна індукція цих матеріалів може досягати

значення $B_r = 1,47$ Тл, а енергетичний добуток $(BH)_{max} = 420$ кДж/м³. Неодимові магніти дешевші, ніж самарієві завдяки відсутності в їх складі достатньо дорогого металу – кобальту. До недоліків слід віднести невисоку робочу температуру деяких марок, а також низьку корозійну стійкість, яка усувається покриттям поверхні магнітів захисними шарами міді, цинку, нікелю, хрому.

Магнітні параметри деяких марок рідкоземельних матеріалів Nd-Fe-B наведені в таблиці 3.

Завдяки високим магнітним властивостям, використання матеріалів Nd-Fe-B дозволяє суттєво зменшити габарити існуючих магнітних систем та створити більш компактні ловильні пристрої з мінімальною площею полюсів магнітів. Для пристроїв, призначених для роботи в глибоких свердловинах потрібно використовувати постійні неодимові магніти, леговані диспрозієм, що збільшує максимальну температуру використання магнітної системи до 200 °С.

Четверта група матеріалів - композиційні магнітотверді матеріали. Їх виготовляють на основі порошків магнітотвердих матеріалів однієї із груп (альніко, ферити, рідкоземельні матеріали Nd-Fe-B і Sm-Co, а також їх комбінації) і полімерної зв'язки. Як зв'язуючий компонент можуть використовувати пластмаси або каучук, відповідно матеріали називають магнітопластами або магнітоеластами. Переваги цих матеріалів – технологічність виготовлення та оброблення, пластичність, низька трудомісткість виготовлення магнітів складних форм. Взагалі композиційні матеріали володіють фізичними властивостями, що типові для зв'язуючого компонента. Проте вони мають і ряд недоліків. Робочі температури магнітопластів низькі в порівнянні з робочими температурами спечених магнітів. Верхня температурна межа використання встановлюється температурним станом зв'язуючого компонента (зазвичай ця величина складає від 80 °С до 220 °С). Крім того, магнітні параметри значно нижчі, ніж у спечених магнітних матеріалів. Так, наприклад, максимальний енергетичний добуток для композиційних рідкоземельних магнітів складає лише 90 кДж/м³.

Відомі ловильні пристрої на рівні винаходів, в магнітних системах яких використовують композиційні магнітотверді матеріали [11].

Порівняльний аналіз основних характеристик магнітних матеріалів, зображений на рисунку 1, дозволив встановити наступне:

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

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

- рідкоземельні магніти дорожчі за феритові в десятки разів.

Таблиця 3 – Магнітні параметри матеріалів Nd-Fe-B [4, 10]

Марка	Залишкова магнітна індукція B_r , Тл	Коерцитивна сила за індукцією H_{cB} , кА/м	Коерцитивна сила за намагніченістю H_{cJ} , кА/м	Максимальний добуток $(BH)_{max}$, кДж/м ³	Максимальна робоча температура T_p , °С
N30	1,08-1,12	780-836	≥ 955	223-239	80
N42	1,29-1,32	860-955	≥ 955	318-334	80
N48	1,42-1,47	860-995	≥ 955	380-422	80
N33M	1,14-1,17	820-876	≥ 1114	247-263	100
N40M	1,26-1,29	860-955	≥ 1114	303-318	100
N48M	1,37-1,42	860-995	≥ 1114	358-382	100
N27H	1,02-1,06	756-804	≥ 1353	199-215	120
N38H	1,22-1,26	860-915	≥ 1353	287-303	120
N42H	1,29-1,32	860-955	≥ 1353	318-334	120
N30SH	1,08-1,12	804-844	≥ 1592	223-239	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
N33UH	1,14-1,17	820-876	≥ 1990	247-263	180
N38UH	1,22-1,26	860-915	≥ 1990	287-303	180
N28EH	1,04-1,08	780-812	≥ 2388	207-223	200
N33EH	1,14-1,17	820-876	≥ 2388	247-263	200
N35EH	1,17-1,21	860-915	≥ 2388	263-279	200

Примітка. Літери М, Н або поєднання букв SH, UH чи EH вказують на максимальну температуру використання, яка становить 100, 120, 150, 180 або 200 °С.

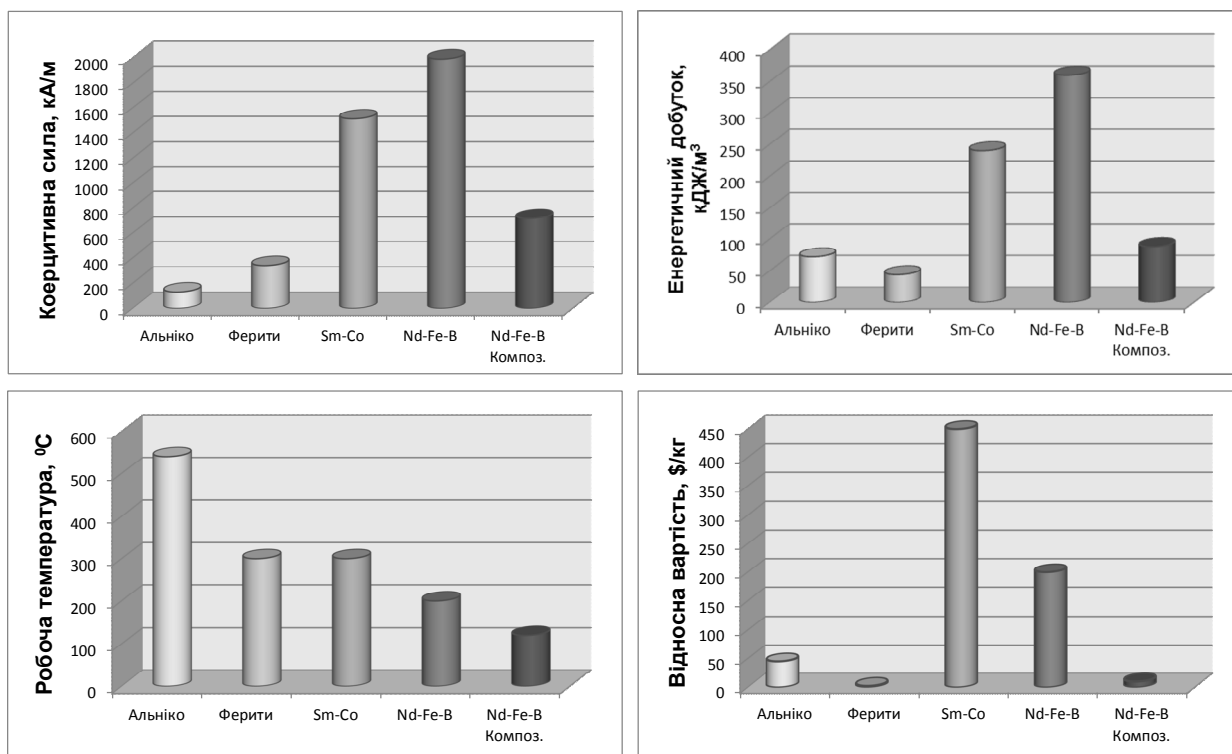


Рисунок 1 – Порівняльні діаграми основних характеристик магнітотвердих матеріалів

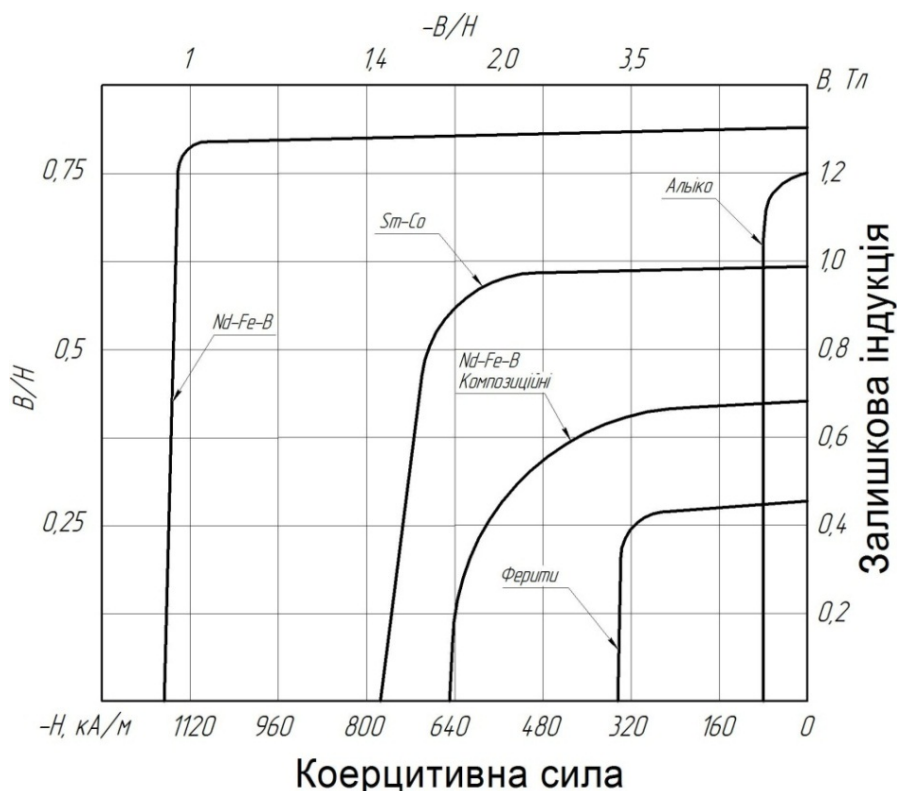


Рисунок 2 – Криві розмагнічування магнітотвердих матеріалів [4, 10]

Властивості постійних магнітів характеризуються кривою розмагнічування – ділянкою петлі гістерезису магніту, розміщеною у другому квадранті координат. Петля гістерезису (або крива $B - H$) описує залежність намагніченості від напруженості магнітного поля при циклічній зміні напруженості поля. Постійний магніт має певну робочу точку, яка може рухатися по кривій під впливом певних розмагнічуючих факторів, або ж залишатися фіксованою. Три найважливіші точки кривої $B - H$ – це точки, в яких вона перетинає осі B і H (визначають значення залишкової магнітної індукції B_r та коерцитивної сили за намагніченістю H_{cj}) та точка, в якій добуток B і H максимальний.

На рисунку 2 зображено криві розмагнічування основних класів магнітотвердих матеріалів. В залежності від марки магніту вони можуть дещо відрізнятися, проте загалом характеризують клас матеріалу. В результаті аналізу кривих розмагнічування бачимо, що магніти на основі рідкоземельних металів мають значно вищі характеристики. Так, залишкова індукція цих магнітів у 2,5 рази перевищує залишкову індукцію магнітів на основі фериту барію, коерцитивна сила – у 6 разів. Це дає змогу досягти максимально можливої магнітної індукції на робочій поверхні системи, що наближається до індукції насичення магнітопроводів (2,13 Тл), виготовлених із магнітом'яких матеріалів. Серед рідкоземельних магнітів неодимові магніти володіють на 20-25% кращими магнітними характеристиками, ніж самарій-кобальтові.

Незважаючи на широкий вибір магнітотвердих матеріалів, жоден з них не задовольняє всіх вимог. Найбільш придатними є магніти із сплавів на основі рідкоземельних металів хімічного складу $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Вони володіють найкращими магнітними властивостями (найвище значення магнітної енергії серед усіх груп магнітів) та значно дешевші за магніти Sm-Co. Крім того, параметри матеріалів системи Nd-Fe-B ще не досягли теоретично встановленої межі, тому саме для них можна очікувати подальшого покращення властивостей.

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

Основні магнітні параметри магнітів в таблиці 3 наведено для нормальної температури 20 °С. Тому для оптимального використання магнітотвердих матеріалів потрібно звертати увагу на температурні коефіцієнти, які визначають зміну кривої розмагнічування при тепловому впливі на матеріал та температуру Кюрі T_c . Температурний коефіцієнт магнітної індукції α для неодимових магнітів змінюється в межах $-(0,07-0,13) \text{ \%}/^\circ\text{C}$ (при нагріванні на 100 °С залишкова магнітна індукція знижується від 7 до 13 %), а температурний коефіцієнт коерцитивної сили β становить $-(0,55-0,65) \text{ \%}/^\circ\text{C}$. Магніти Nd-Fe-B мають низьку температуру точки Кюрі T_c (критична температура, при якій

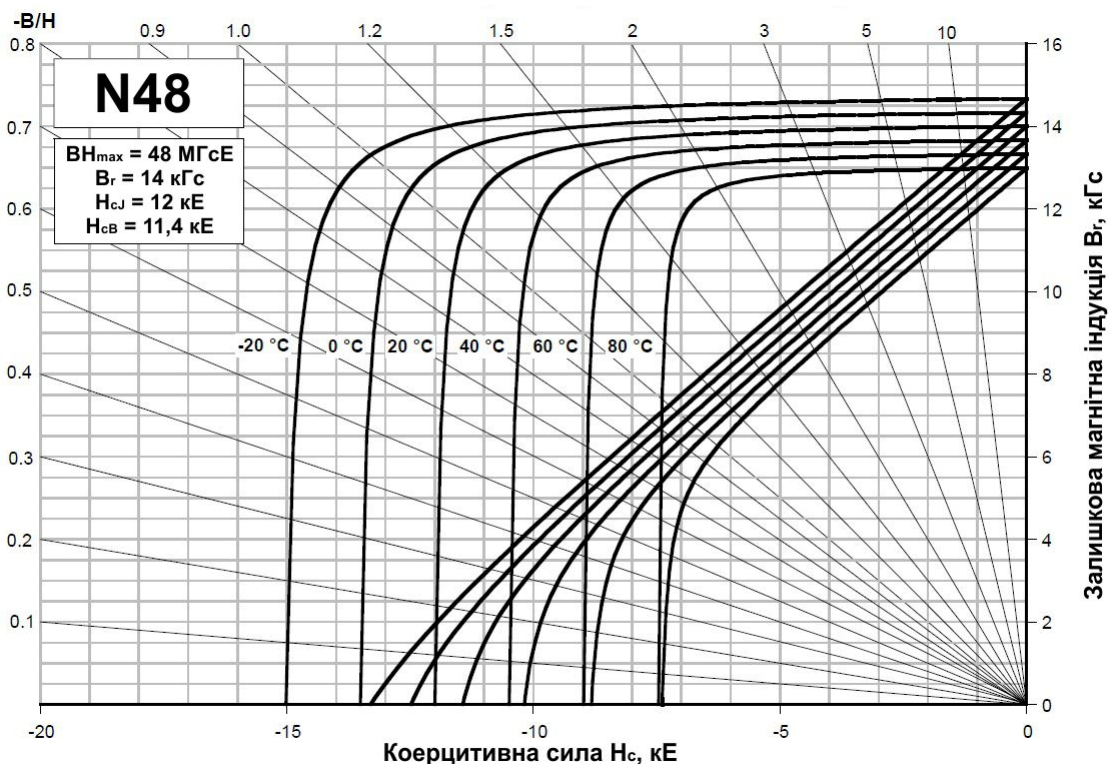


Рисунок 3 – Криві розмагнічування магніту марки N48 залежно від робочої температури [10]

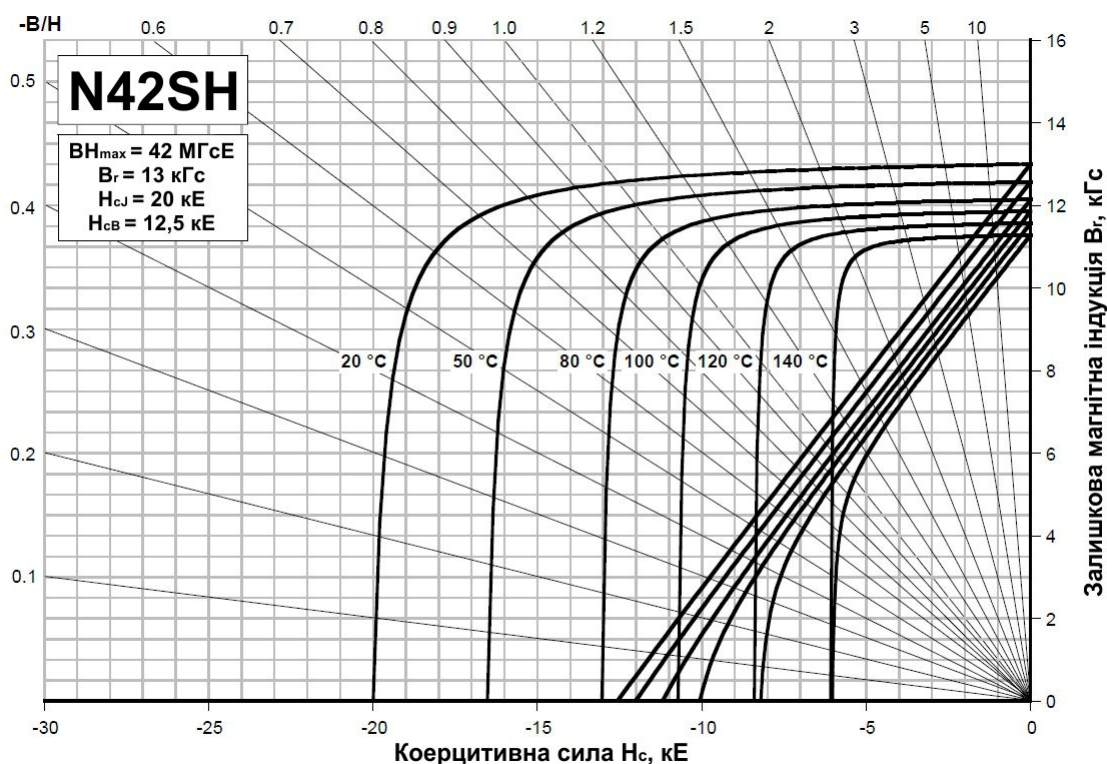


Рисунок 4 – Криві розмагнічування магніту марки N42SH залежно від робочої температури [10]

феромагнетик стає парамагнетиком) – приблизно 310 °С, проте її можливо підвищити. Температурні коефіцієнти виражають зворотні втрати властивостей постійних магнітів, які відновлюються, коли температура повертається до початкового значення. З перевищенням робочої температури магніту, коли робоча точка опускається нижче коліна кривої розмагнічу-

вання, виникають незворотні зміни, які проявляються в частковому або повному розмагнічуванні магніту. Ці втрати можна відновити лише перемагнічуванням постійного магніту.

На рисунках 3 та 4 зображено криві розмагнічування неодимових постійних магнітів марок N48 та N42SH за різних температур. При нагріванні коерцитивна сила рідкоземельних

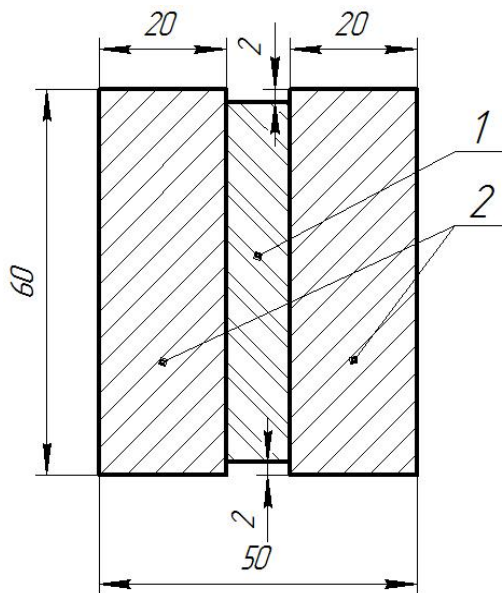
магнітотвердих матеріалів зменшується, що може призвести до незворотного розмагнічування магнітів. При охолодженні магнітів зростає як залишкова індукція, так і коерцитивна сила. Це пояснюється тим, що температурні коефіцієнти зміни залишкової індукції α та коерцитивної сили β завжди від'ємні, отже незворотні зміни магнітного поля виникнути не можуть.

Відомо, що температура на вибої свердловини відрізняється від температури на поверхні. Хоча наявність магнітопроводів дещо підвищує термостабільність магнітної системи, проте неодимові постійні магніти з робочою температурою 80 °С можна використовувати в ловильних пристроях тільки для неглибоких свердловин. Для глибоких свердловин необхідно використовувати постійні магніти з максимальною робочою температурою 150-200 °С. Досягти підвищення робочої температури можна шляхом легування диспрозієм, кобальтом, ніобієм, ванадієм і т.д. Покриття даними елементами покращує температурну і корозійну стабільність магнітів, проте різко збільшує їх вартість. Крім того, високотемпературні неодимові магніти володіють нижчими магнітними властивостями. Тому у системах магнітних ловильних пристроїв, що експлуатуються у свердловинах за температур вище 180 °С доцільно використовувати магніти сплаву самарій-кобальт.

Проведений аналіз дозволив встановити властивості магнітотвердих матеріалів без урахування їх роботи в магнітних системах. Тому для повної характеристики постійних магнітів потрібно враховувати вплив магнітопроводів – концентраторів магнітного потоку. Для цього проведемо розрахунок магнітного поля для елементарної магнітної системи, складеної із двох магнітопроводів товщиною 20 мм та постійного магніту товщиною 10 мм. Як матеріал постійного магніту в першому випадку використаємо ферит барію (марка 28БА190), в другому – неодим-залізо-бор (марка N42SH). Розрахунок магнітних полів систем будемо виконувати методом скінченних елементів, використовуючи пакет програми ELCUT 5.10 [12].

ELCUT дозволяє вирішувати задачі магнітостатики в лінійній та нелінійній постановках. Джерелом поля служить постійний магніт, на-

магніченість якого задається величиною коерцитивної сили. За граничні умови використаємо умову Діріхле. В даному випадку задаємо значення векторного магнітного потенціалу $A_0 = 0$ на зовнішній границі розрахункової області для вказання повного затухання магнітного поля. Геометрія дослідженої моделі системи наведена на рисунку 5. Всі вихідні дані для розрахунку зведені до таблиці 4.



1 – постійний магніт; 2 – магнітопровід

Рисунок 5 – Ескіз ділянки магнітної системи

Результати розрахунку магнітної індукції та картини магнітного поля для системи із феритовим магнітом наведені на рисунку 7, з неодимовим – на рисунку 8. Магнітні силові лінії, проходячи через магнітопроводи, створюють на робочій поверхні системи магнітне поле. Найбільша концентрація магнітного потоку спостерігається біля робочої поверхні системи. Значення магнітної індукції на робочій поверхні магнітної системи на основі рідкоземельних постійних магнітів марки N42SH значно перевищують аналогічні показники системи з феритовими магнітами 28БА190, хоча сам характер розподілу магнітної індукції залишається незмінним. Це пояснюється істотно вищими характеристиками рідкоземельних магнітів.

Таблиця 4 – Вихідні дані для розрахунку магнітної системи

Параметр задачі	Значення параметра	
	Варіант 1	Варіант 2
Тип задачі	Нелінійна задача магнітостатики	
Геометрія моделі	Рисунок 5	
Тип і марка постійних магнітів	Ферито-барієві, 28БА190	Рідкоземельні, N42SH
Відносна магнітна проникність μ	1 2000	
Крива розмагнічування постійного магніту	Рисунок 6	Рисунок 4
Граничні умови	Умова Діріхле	

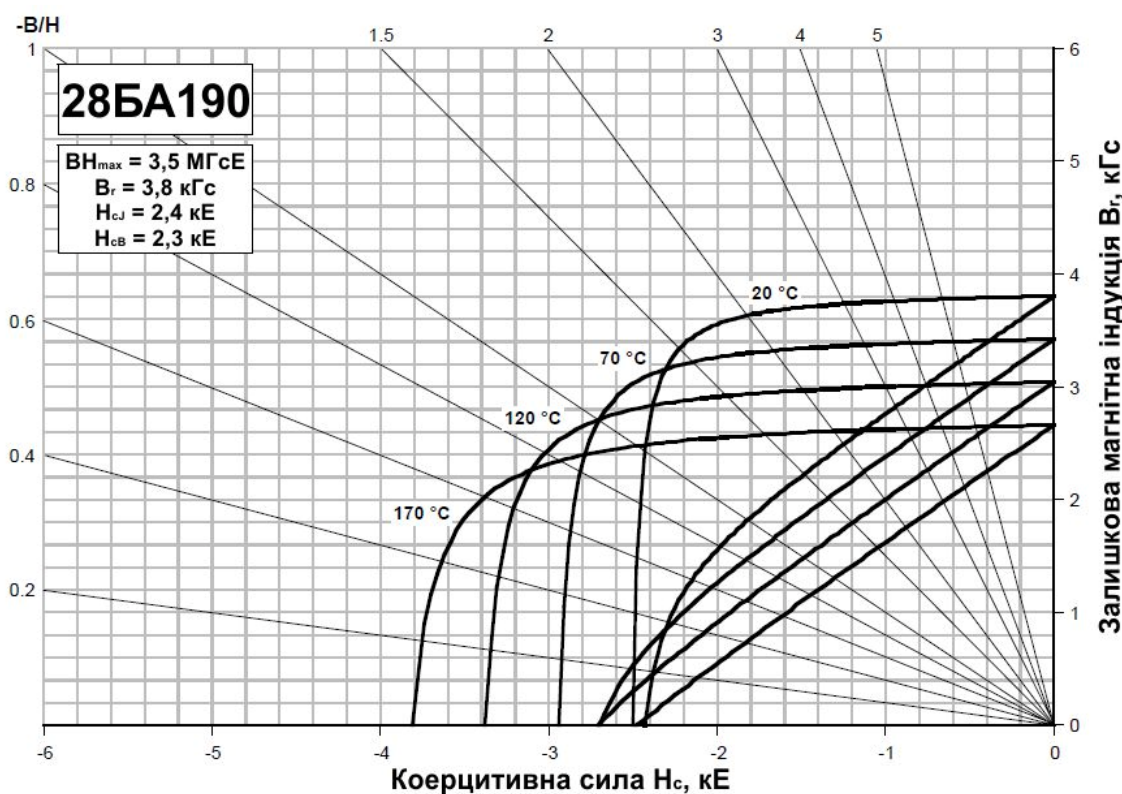


Рисунок 6 – Криві розмагнічування магніту марки 28БА190 залежно від робочої температури [10]

Отримані дані з певними припущеннями можна перенести на реальні магнітні системи, що використовуються в ловильних пристроях.

Таким чином, за результатами проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

- на основі аналізу умов роботи магнітних ловильних пристроїв встановлено вимоги до конструкції їх систем та критерії вибору матеріалу постійних магнітів;

- проаналізовано властивості сучасних магнітотвердих матеріалів та визначено область їх раціонального застосування в ловильних пристроях;

- обґрунтована доцільність використання в системах ловильних пристроїв рідкоземельних магнітів сплаву неодим-залізо-бор;

- розроблено рекомендації щодо вибору марки неодимових магнітів в системах ловильних пристроїв у залежності від температури на вибої;

- результати розрахунку магнітного поля в програмі двовимірного моделювання ELCUT показують, що системи на основі рідкоземельних постійних магнітів за магнітною індукцією у 3-4 рази перевищують системи на базі феритових магнітів.

Подальші дослідження будуть проводитися для з'ясування раціональних геометричних співвідношень елементів магнітних систем ловильних пристроїв при використанні неодимових рідкоземельних магнітів.

Література

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

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

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

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

7 National Oilwell VARCO. BOWEN Fishing Magnets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nov.com/Downhole/Fishing_Tools/Junk_Catch_Fishing_Tools/Fishing_Magnets.aspx

8 Константинов О. Я. Магнитная технологическая оснастка / О. Я. Константинов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.

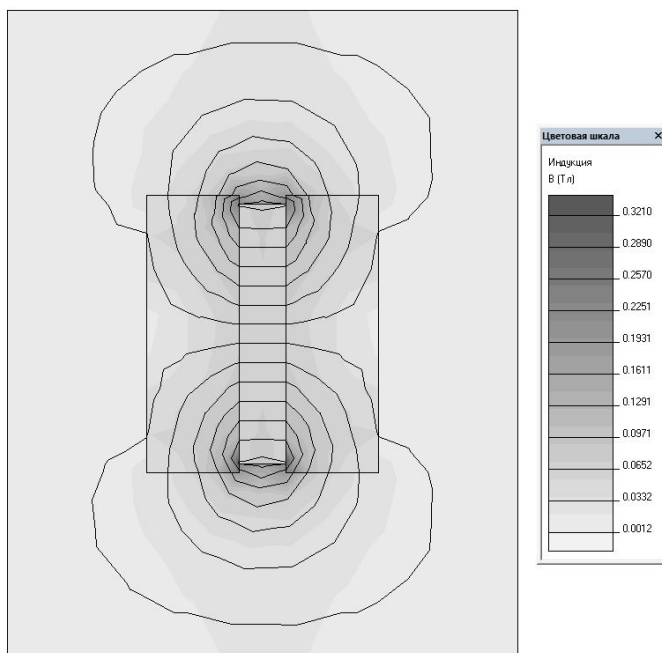


Рисунок 7 – Розподіл магнітної індукції системи з феритовим постійним магнітом

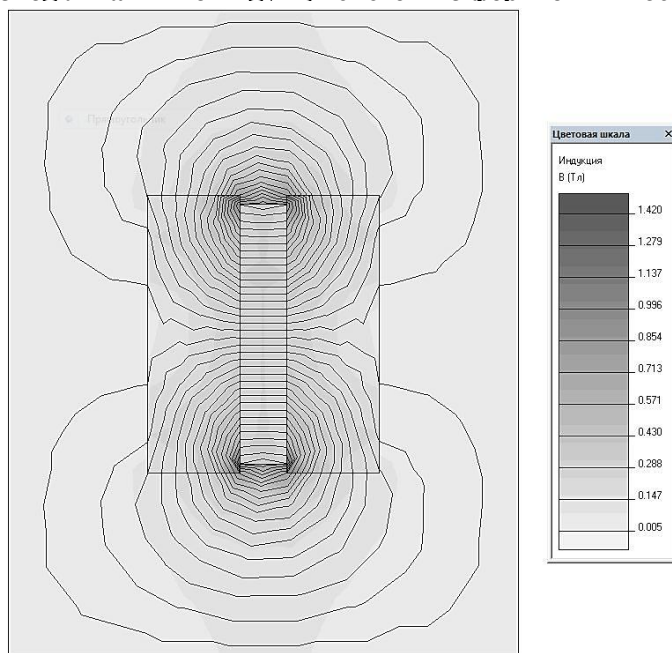


Рисунок 8 – Розподіл магнітної індукції системи з рідкоземельним постійним магнітом

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

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

11 А. с. 1328478 СССР, МКИЕ 21 В 31/06. Магнитный ловитель / Л. В. Евчук, П. В. Тарабарин, Т. И. Сабан, Л. И. Романишин. – № 4045020/22-03; заявл. 03.03.86; опубл. 07.08.87, Бюл. № 29.

12 ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство

пользователя [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: Производительный кооператив ТОР, 2010. – Режим доступа: <http://elcut.ru/demo/manual.pdf>

Стаття надійшла до редакційної колегії
28.01.13

Рекомендована до друку
професором **Івасівим В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Горкуновим Б.М.**

(НТУ "Харківський політехнічний інститут",
м. Харків)