

УДК 623.674

О. В. Кулаков, к.т.н., доцент, пров. н.с. лаб. (ORCID 0000-0001-5236-1949)
М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. наук.-дослідн. лаб. (ORCID 0000-0002-6960-6399)
Є. О. Макаров, PhD, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-0785-3041)
С. О. Степанчук, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-6618-4119)
Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

МОДЕЛЬ ПІДЙОМУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ПОШУКОВИМИ НЕОДИМОВИМИ МАГНІТАМИ ПРИ ПІДВОДНОМУ РОЗМІНУВАННІ

Досліджена можливість застосування пошукових неодимових магнітів для підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів. Показано, що величина магнітної індукції, необхідна для підйому вантажів за допомогою магніту, залежить від площини його робочої поверхні за законом, близьким до гіперболічного. Враховуючи, що магнітна проникність води близька до 1, вода незначно послаблює магнітне поле, яке крізь неї проходить, й водне середовище суттєво не впливає на магнітні властивості магніту за умов його належної гідроізоляції. Побудовано модель, що описує особливості підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів циліндричної геометричної форми (артилерійських снарядів (пострілів)) за допомогою пошукових неодимових магнітів. Враховуючи, що закономірність зміни величини магнітної індукції магнітного поля за межами магніту не залежить від джерела його походження, отримано, що магнітна індукція на відстані r від робочої поверхні магніту у формі диску діаметром D , намагніченого аксіальне, буде змінюватися згідно закономірності $D^3/(D^2+4\cdot r^2)^{3/2}$. Чим більшим є діаметр магніту, тим повільніше зменшується магнітна індукція при видаленні від магніту. З геометричних міркувань визначено, що величина еквівалентної повітряної відстані між робочими поверхнями магніту у формі диску, намагніченого аксіальне, та металевого циліндру (еквіваленту корпусу артилерійського снаряду (пострілу)) від діаметру магніту для усіх досліджених діаметрів металевого циліндру (артилерійських снарядів (пострілів) малого та середнього калібрів) має параболічний характер. При збільшенні діаметру металевого циліндру (калібру артилерійського снаряду (пострілу)) для фіксованого значення діаметру магніту еквівалентна повітряна відстань зменшується. Зроблені конкретні рекомендації щодо вибору пошукового неодимового магніту для підйому на поверхню води артилерійських снарядів калібром 152 мм та 122 мм.

Ключові слова: вибухонебезпечний предмет, підводне розмінування, коерцитивна сила, магнітна індукція, неодимовий магніт

1. Вступ

Гуманітарне підводне розмінування – це комплекс заходів, спрямованих на очищення водних об'єктів та прибережних зон від вибухонебезпечних предметів для забезпечення безпеки людей та відновлення економічної, соціальної діяльності. Процес гуманітарного підводного розмінування включає технічне та нетехнічне обстеження, а також безпосереднє знешкодження знайдених вибухонебезпечних предметів водолазами-саперам [1].

За даними Державного агентства водних ресурсів України, загальна площа водних об'єктів України становить близько 12074 км², що складає приблизно 2 % від загальної площі країни [2]. Ця площа включає поверхні внутрішніх вод, таких як річки, озера, водосховища та ставки. В Україні налічується понад 1103 водосховища із сумарною площею водного дзеркала близько 9368 км². На річках України створено понад 49400 ставків загальною площею понад 2890 км². В Україні існує близько 20 тис. озер. На території України протікає 63119 річок загальною довжиною понад 206 тис. км (на 1 км² території України припадає понад 0,34 км річок). Загальна площа боліт становить до 12 тис. км² (1,7 % від загальної площі країни). Довжина берегової лінії Чорного моря в межах України становить 1540 км.

Після відкритого воєнного нападу російської федерації на Україну 24 лютого 2022 року протимінна діяльність в Україні змінилася кардинально. Україна стала найбільш замінованою країною світу. Понад 137 тис. км² території України мають статус потенційно небезпечних. Після деокупації Київщини, Чернігівщини, Харківщини та Сумщини стало очевидно, що ці території є замінованими. Внаслідок цього люди не можуть безпечно повернутися додому. Частина замінованої території припадає на водні об'єкти.

Таким чином, гуманітарне підводне розмінування є актуальним державним завданням в умовах сьогодення. Існує проблема підвищення ефективності гуманітарного підводного розмінування зокрема з використанням магнітів.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Для підводних робіт зазвичай використовуються спеціальні електромагніти, призначені для підйому і переміщення металевих предметів у воді. Вони повинні бути герметичними і стійкими до впливу води.

ТОВ «Дніпроелектросила» (DEMZ[®]) випускає вантажопідйомний електромагніт серії Neptune для роботи під водою [3]. Електромагніт підйомний постійного струму типу КЕМ серії Neptune призначений для використання у воді та на поверхнях з захопленням та переміщенням холодних (екологічних) вантажів з феромагнітних матеріалів за допомогою кранових механізмів: металобрухт, відходи, металева стружка, катаний метал, злитки, сляби тощо, а також може використовуватися як сепаратор для феромагнітних включень. Може використовуватися на річкових та морських судах для очищення води від металевих сміття та брухту.

Німецька компанія Woko розробила електромагнітні підйомники, придатні для роботи під водою [4]. Обмотка електромагніту герметично залита теплопровідним компаундом, а нижня поверхня захищена товстою немагнітною сталевією плитою. Це запобігає пошкодженню котушки ударами та проникненню води, забезпечуючи довговічність у польових умовах. Такі магніти застосовують для очищення дна портів від металобрухту. Сапери очищували порти Гамбурга від бомб, що не розірвалися, саме потужними електромагнітами компанії Woko на кранах – швидко і без занурення людей.

В США фахівцями дослідницької лабораторії ВМС (U.S. Naval Research Laboratory) під керівництвом Jim McDonald проводилися дослідження щодо підйому з під води боєприпасів, що не вибухнули (Final Report MM-0606-FR). Була запропонована напівавтоматична система, що забезпечує ефективний, відносно економічний і безпечний підхід до вилучення одиночних вибухонебезпечних предметів на мілководді (глибина не більше 15 футів). Вибухонебезпечні предмети візуалізуються за допомогою телебачення та/або гідролокатора й дистанційно піднімаються на поверхню за допомогою електромагніту або механічного грейфера. Найбільшу проблему уявляла система візуалізації. Телевізійна камера постійно не спрацьовувала належним чином для ідентифікації вибухонебезпечних предметів, особливо при погіршення видимості. Система підйому вибухонебезпечних предметів працювала бездоганно.

Пошукові неодимові магніти з'явилися відносно недавно. Неодимові магніти розроблені незалежно один від одного в 1984 році компанією GM (General Motors, США) і в 1970-х роках компанією Sumitomo Metal Industries (Японія) [5]. Неодимові магніти не знайшли широкого застосування для розмінування, оскільки їх використування може пошкодити цивільну безпеку. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-1

стання під час розмінування може нести певні ризики для життя саперів. Використання пошукових неодимових магнітів доцільно у випадках, коли достойменно відомо про відсутність можливості детонації вибухонебезпечних предметів.

Ще у 2016 році ініціатива, очолювана Женевським міжнародним центром гуманітарного розмінування (ЖМЦГР), призвела до публікації стандарту Організації Об'єднаних Націй щодо протимінної діяльності, посібника з найкращих практик ЖМЦГР та наземних оцінок місць розташування підводних вибухонебезпечних боєприпасів у дванадцяти країнах світу [6], однак і сьогодні залишається велика кількість невирішених проблемних питань. На прикладі водолазної технології, що використовується в системах мінної боротьби, в роботах [7, 8] методика обговорюється з огляду на відповідність вимогам Організації стандартизації НАТО. Узагальнений аналіз методик підводного розмінування проведено в роботі [9]. У статті [10] розглядається виявлення плавучих та підводних морських мін за зображеннями, записаними з камер (знятими з дронів, підводних човнів, кораблів, катерів). Мережі були навчені та порівняні за допомогою 3 типів моделей глибокого навчання Yolov5, SSD та EfficientDet (Yolov5, SSD для плавучих мін та Yolov5 та EfficientDet для підводних мін). Але в цих роботах акцент проводиться на системах виявлення мін, та майже не приділяється увага питанням їх вилучення та утилізації.

Окремим складним питанням є організації дій під час проведення підводного розмінування [11, 12]. Перевагою отриманих результатів є можливість отримання як кількісних оцінок впливу безпосередніх складових системи «водолаз-сапер – спеціальні засоби підводного розмінування – підводна локація вибухонебезпечного об'єкта», так і їх взаємозв'язку. Недоліком є велика кількість експериментальних результатів, які необхідно отримати для реалізації обраного плану. В роботі [13] авторами показана необхідності коригування діяльності особового складу невійськових організацій на додаток до навичок, що надаються під час первинної підготовки спеціалізованими підрозділами ВМС. Процес запобігання надзвичайним ситуаціям, пов'язаним з підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, необхідно розглядати з урахуванням суттєвих відмінностей у діяльності саперів Державної служби з надзвичайних ситуацій України від діяльності саперів ВМС Збройних Сил України, що було показано.

Основним недоліком існуючих сьогодні методів підводного розмінування є їх спрямованість на розмінування саме морських мін, що не вирішує всі проблемні питання в Україні [14].

Труднощі під час застосування магнітів для підводного розмінування обумовлюються, зокрема, складною геометричною формою вибухонебезпечних предметів, що знижує ефективність їх підйому на поверхню води.

Таким чином, нерозв'язаною частиною проблеми підвищення ефективності гуманітарного підводного розмінування є відсутність математичної моделі, яка враховує розміри та особливості геометричної форми вибухонебезпечних предметів, що підіймаються на поверхню води за допомогою магнітів, зокрема пошукових неодимових.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження особливостей підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів пошуковими неодимовими магнітами при гуманітарному підводному розмінуванні.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Дослідити можливість застосування пошукових неодимових магнітів для підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів.
2. Побудувати модель, що враховує розміри та особливості геометричної форми вибухонебезпечних предметів, що підіймаються на поверхню води пошуковими неодимовими магнітами.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес застосування пошукових неодимових магнітів для гуманітарного підводного розмінування.

Предметом дослідження є параметри пошукових неодимових магнітів, що застосовуються для підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів циліндричної геометричної форми.

Гіпотезою дослідження є припущення, що пошукові неодимові магніти можуть використовуватися для гуманітарного підводного розмінування. Параметри пошукових неодимових магнітів визначаються матеріалом, вагою, геометричними розмірами та формою вибухонебезпечних предметів.

Побудова моделі, що враховує розміри та особливості геометричної форми вибухонебезпечних предметів, що підіймаються на поверхню води за допомогою пошукових неодимових магнітів, здійснюється на основі закону Біо і Савара-Лапласа та геометричного моделювання.

Розрахунки проводимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple та MatLab.

5. Дослідження можливості застосування неодимових магнітів для підйому вибухонебезпечних предметів

Магніт – тіло, що має власне магнітне поле [15]. Відрізняють електромагніти та постійні магніти.

Електромагніт – виріб, магнітне поле якого створюється внаслідок протікання електричного струму по котушці, намотаної поверх феромагнітного осердя, що має велику магнітну проникність.

Постійний магніт – це виріб з магніто-твердого матеріалу (залізо, нікель, кобальт, сплави рідкісноземельних металів тощо), який зберігає магнітні властивості протягом тривалого часу. Постійний магніт є джерелом магнітного поля без зовнішнього джерела енергії. Постійний магніт можна вважати окремими випадком електромагніту з осердям, що має високу коерцитивну силу. Найбільш потужними постійними магнітами вважаються неодимові магніти.

Неодимові магніти виготовлені зі сплаву неодима, заліза й бору [5]. Хімічна формула $Nd_2Fe_{14}B$. Це дає змогу цим магнітам зберігати свій магнетизм протягом тривалого часу, навіть під впливом протилежних магнітних полів.

Слід зазначити, що термін «постійний магніт» вказує на те, що магнітні властивості зберігаються тривалий час. Але, з часом, під впливом зовнішніх факторів, таких як температура, механічні впливи або інші магнітні поля, магнітна сила постійного магніту може зменшуватися. Неодимові магніти втрачають не більше 1–2 % своєї намагніченості за 10 років. Проте їх можна легко розмагнітити, нагрівши до температури +70 °C і більше.

Під час використання неодимових магнітів для підводного розмінування слід враховувати, що $Nd_2Fe_{14}B$ є вразливим до корозії. Корозія розповсюджує-

ся вздовж меж зерен спеченого матеріалу. Внаслідок цього неодимовий магніт може бути у гіршому випадку подрібнений до порошкового стану, а у кращому випадку – розколотий.

Неодимові магніти класифікуються за робочою температурою та магнітними властивостями [5]. Робоча температура позначається літерою:

N (Normal) – робочий діапазон температур, що не перевищує 80 °С,

M (Medium) – робочий діапазон температур, що не перевищує 100 °С,

H (High) – нагрів магніту до температури, що не перевищує 120 °С,

SH (Super High) – максимальна робоча температура, що не перевищує 150 °С,

UH (Ultra High) – максимальна робоча температура, що не перевищує 180 °С,

EH (Extra High) – максимальна робоча температура, що не перевищує 200 °С.

Магнітні властивості позначаються цифрами. В табл. 1 приведено розшифровку параметрів магніту температурного режиму N.

Табл. 1 Параметри неодимового магніту температурного режиму N

| Клас | Залишкова магнітна індукція, [міліТл] | Коерцитивна сила, [кА/м] | Магнітна енергія, [кДж/м ³] |
|------|---------------------------------------|--------------------------|---|
| N35 | 1170÷1120 | ≥955 | 263÷287 |
| N38 | 1220÷1250 | ≥955 | 287÷310 |
| N40 | 1250÷1280 | ≥955 | 302÷326 |
| N42 | 1280÷1320 | ≥955 | 318÷342 |
| N45 | 1320÷1380 | ≥955 | 342÷366 |
| N48 | 1380÷1420 | ≥876 | 366÷390 |
| N50 | 1400÷1450 | ≥876 | 382÷406 |
| N52 | 1430÷1480 | ≥876 | 398÷422 |

У 2-му стовпці вказано значення залишкової магнітної індукції, у 3-му стовпці вказано величину коерцитивної сили – величина магнітного поля, в якому слід розташувати магніт для його розмагнічування, у 4-му стовпці вказано магнітну енергію – яке зусилля потрібно докласти щоб відірвати електромагніт від робочої поверхні (дорівнює 0,1 кгс). 1 кгс дорівнює силі, з якою тіло масою 1 кг давить на ваги на поверхні землі: 1 кгс=9,80665 Н ≈ 10 Н.

Зустрічається чотири види намагніченості неодимових магнітів:

- аксіальна (направленість магнітного поля проходить по центрі магніту, та має зверху північ, а знизу – південь; зустрічається на будь яких формах неодимового магніту);

- діаметральна (вектор намагніченості продовж діаметра магніту, іншими словами північ і південь по бокам);

- радіальна (направлення намагніченості від краю магніту до центру по радіусу; тобто в центрі південний, а по бокам - північні полюси; така намагніченість стосується магнітів у формі кільця);

- багатополюсна (мультиполярна; має декілька магнітних полюсів на одній поверхні).

Під час гуманітарного підводного розмінування досить часто зустрічаються вибухонебезпечні предмети у вигляді артилерійських снарядів (пострілів) малого (20-75 мм) та середнього (76–152 мм) калібрів. Серед найпоширеніших калібрів артилерійських снарядів – 76 мм, 85 мм, 100 мм, 122 мм, 125 мм та 152/155 мм. Калібр є ключовою характеристикою, що визначає розмір снарядів та можливості артилерійських систем.

Відомості про масу деяких снарядів для артилерійських пострілів роздільного заряджання приведено в табл. 2, для артилерійські пострілів унітарного заряджання в табл. 3.

Табл. 2 Снаряди для артилерійських пострілів роздільного заряджання [16]

| Тип снаряду | Індекс снаряду | Маса снаряду, кг | Маса вибухової речовини, кг |
|---|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 152-мм снаряд до гаубиці «Мста-Б» | | | |
| Осколково-фугасний | 3ОФ45 | 43,56 | 7,65 |
| Касетний з осколковими бойовими елементами (БЕ) | 3-О-13 | 57,9 (8 БЕ × 1,4 кг) | 0,23 на один БЕ |
| Касетний з кумулятивно-осколковими БЕ | 3-О-23 | 42,8 (40 БЕ × 0,36 кг) | 0,042 на один БЕ |
| Що коректується | 3ОФ39 | 50 | 6,6 |
| 122-мм снаряд (на прикладі снарядів для гаубиці Д-30) | | | |
| Осколково-фугасний | ОФ-462Ж (ОФ-24) | 21,76 | 3,528 |

Табл. 3 Артилерійські постріли унітарного заряджання [16]

| Тип пострілу | Індекс пострілу | Маса пострілу, кг | Маса снаряду, кг | Маса вибухової речовини, кг |
|---|-----------------|--|------------------|-----------------------------|
| 100-мм постріл до гармати МТ-12 «Рапіра» | | | | |
| Постріл з осколково-фугасним снарядом | 3УОФ12 | 28,9 | 16,7 | 7,65 |
| Постріл з бронебійним підкаліберним снарядом | 3УМБ10 | 19,9 | 4,55 | - |
| Постріл з кумулятивним снарядом | 3УБКВ | 23,1 | 9,5 | 5,5 |
| 76-мм постріл до гармати ЗіС-3 | | | | |
| Постріл зі снарядом 53-БР-350А (бронебійний каліберний, тупоголовий, с балістичним наконечником, трасуючий) | 53-УБР-354А | Гільза унітарного 76 мм пострілу виготовлена або з латуні (вага 1,55 кг) або зі сталі (вага 1,41 кг). Заряд пороху 0,455 кг | 6,3 | 0,155 |
| Постріл зі снарядом 53-БР-350П (бронебійний каліберний, тупоголовий, суцільний трасуючий) | 53-УБР-354П | | 6,5 | немає |
| Постріл зі снарядом 53-ОФ-350 (сталевий, осколково-фугасний) | 53-УОФ-354М | | 6,2 | 0,54 |

152 мм снаряд має довжину близько 864 мм, 122 мм снаряд – в межах 650–700 мм, 100 мм постріл – близько 6300 мм.

Магнітні властивості боєприпасів залежать від матеріалів, з яких вони виготовлені. Наприклад, гільза унітарного 76 мм пострілу виготовлена або з не феромагнітного матеріалу латунь (вага 1,55 кг), або зі сталі (вага 1,41 кг). Заряд пороху 0,455 кг.

Таким чином, артилерійські снаряди (постріли), виготовлені з феромагнітних матеріалів, можуть бути вилучені з води за допомогою магнітів з відповідними параметрами. Аналіз інформації табл. 2 та табл. 3 показує, що артилерійські снаряди (постріли) малого та середнього калібрів мають максимальну довжину до 0,63 м та масу до $F=60$ кг.

Визначимо параметри магнітного поля магніту, необхідну для підйому такого вантажу.

$$F = S \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu_a}; \quad (1)$$

де F – підйомна сила магніту, Н; S – площа робочої поверхні (башмаку) магніту, m^2 ; B – магнітна індукція, Тл; $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютна магнітна проникність середовища, в якому працює магніт, Гн/м; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала (магнітна проникність вакууму), μ – відносна магнітна проникність середовища, в якому працює магніт, (безрозмірна величина).

Зв'язок між кілограмами [кг] та ньютонами [Н] визначається через прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с². 1 кг сили є рівним приблизно 9,80665 Н. Таким чином, щоб перевести силу в ньютонів в масу в кілограмах, потрібно силу в ньютонів поділити на прискорення вільного падіння. Тому:

$$F = \frac{S \cdot B^2}{2,51} \cdot 10^6 \text{ Н} = \frac{S \cdot B^2}{24,6} \cdot 10^6, [\text{кг}]. \quad (2)$$

Згідно мети роботи передбачається робота магніту у воді. Властивості середовища в формулі (1) описуються параметром μ_a . Видно, що підйомна сила магніту обернено пропорційна абсолютній магнітній проникності μ_a середовища, в якому працює магніт.

Магнітна проникність повітря близька до магнітної проникності вакууму й можна вважати $\mu_a = \mu_0$.

Магнітна проникність води дорівнює [18]:

$$\mu \approx 0,999991 \quad (3)$$

й, відповідно,

$$\mu_a = 0,999991 \cdot \mu_0. \quad (4)$$

Це означає, що вода є слабким діамагнетиком. Тобто, вода незначно послаблює магнітне поле, яке крізь неї проходить, й водне середовище не впливає суттєво на магнітні властивості магніту за умов його належної гідроізоляції.

На рис. 1 приведено залежність величини магнітної індукції B , потрібної для підйому вантажу масою від 10 кг до 60 кг, від площини S робочої поверхні (башмаків) магніту, розраховану з використанням формули (2).

Залежності, наведені на рис. 1, які змінюються закону, близькому до гіперболічного, доводять, що для підйому вантажу певної маси справедливою буде

закономірність, що при більшій площі S робочої поверхні необхідна менша величина магнітної індукції B , і в той же час – чим більшу магнітну індукцію B має магніт (при однаковій площі S робочої поверхні магніту), тим більшу вагу за його допомогою можна підняти.

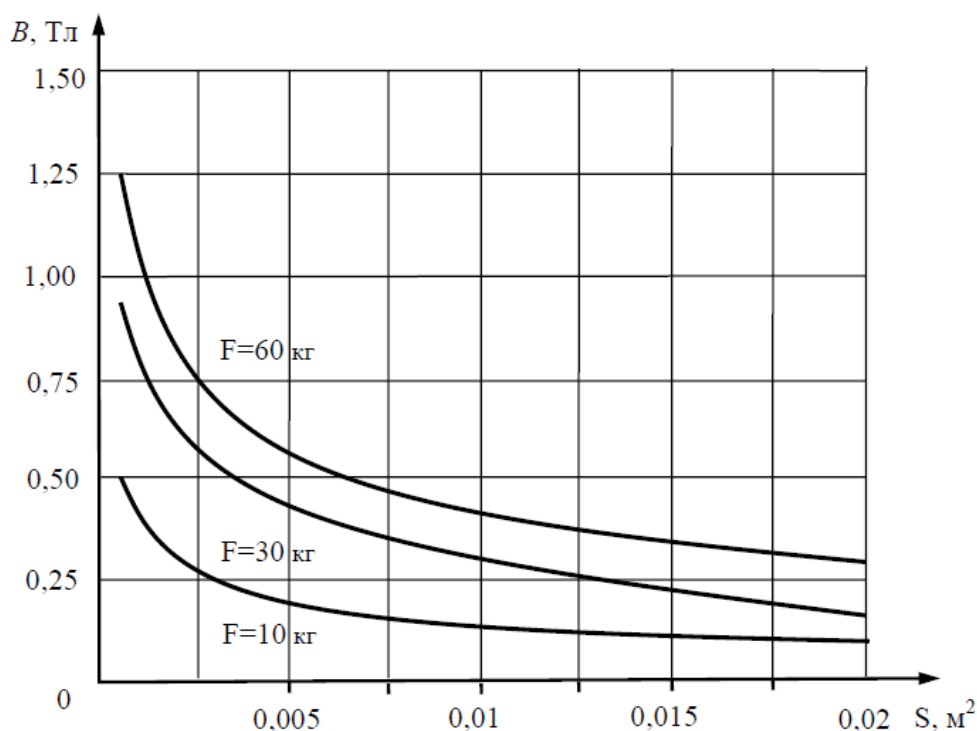


Рис. 1. Залежність величини магнітної індукції B , потрібної для підйому вантажу масою від 10 кг до 60 кг, від площі S робочої поверхні магніту

Залежності, наведені на рис. 1, які змінюються закону, близькому до гіперболічного, доводять, що для підйому вантажу певної маси справедливою буде закономірність, що при більшій площі S робочої поверхні необхідна менша величина магнітної індукції B , і в той же час – чим більшу магнітну індукцію B має магніт (при однаковій площі S робочої поверхні магніту), тим більшу вагу за його допомогою можна підняти.

6. Побудова моделі, що враховує особливості геометричної форми вибухонебезпечних предметів

Встановимо спочатку закономірність зміни величини магнітної індукції B магніту у формі диску радіусом R при збільшенні відстані r від його робочої поверхні (рис. 2).

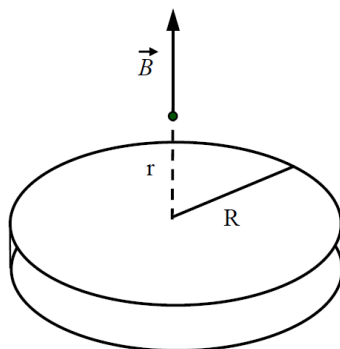


Рис. 2. Магніт у формі диску радіусом R

Закономірність зміни величини магнітної індукції магнітного поля за межами магніту не залежить від джерела його походження (вантажопідйомний електромагніт на постійному електричному струмі або постійний магніт). Відомий закон Біо і Савара-Лапласа [17], який описує зв'язок між магнітними полями та електричними струмами: будь-який елемент провідника зі струмом створює у визначеній точці на відстані від елемента провідника магнітне поле, магнітна індукція якого прямо пропорційна довжині елемента, силі струму, синусу кута між напрямком струму та радіус-вектором, що з'єднує даний елемент із точкою поля, та обернено пропорційна квадрату довжини радіус-вектора (рис. 3).

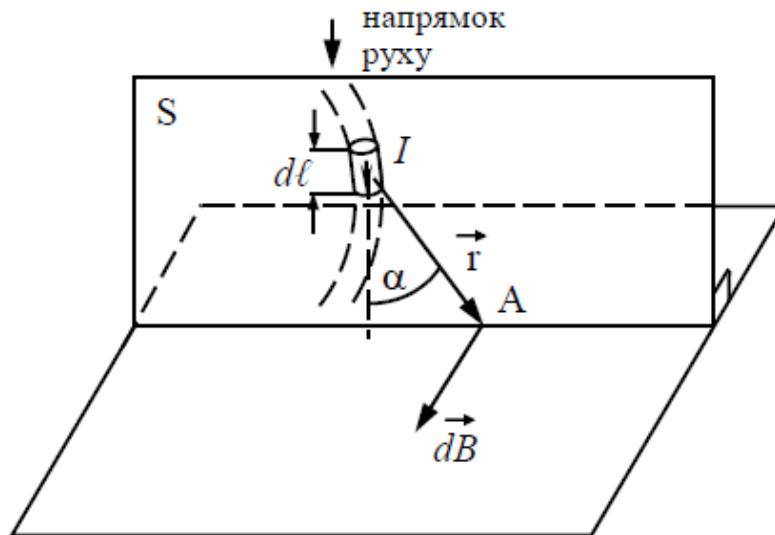


Рис. 3. Пояснення до визначення закону Біо і Савара-Лапласа

Математично закон Біо і Савара-Лапласа записується наступним чином (вираз встановлений дослідницьким шляхом):

$$dB = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (5)$$

де dB – магнітна індукція, Тл; dl – довжина елемента провідника зі струмом, м; r – відстань від елемента провідника до точки визначення магнітної індукції магнітного поля, м; I – сила електричного струму в провіднику, А; dl – довжина елемента провідника, що створює магнітне поле, м; α – кут між напрямком струму та радіус-вектором, що з'єднує даний елемент із точкою магнітного поля, град.

Вектор $d\vec{B}$ направлений перпендикулярно площі S , в якій розташовано радіус-вектор \vec{r} та елемент dl . Напрямок вектора $d\vec{B}$ визначається за правилом буравчика: якщо буравчик рухається вздовж елемента провідника за напрямком струму, то один кінець його рукоятки проходить крізь площину S у тому ж напрямку, в якому її пронизує вектор $d\vec{B}$; при цьому точка, в якій цей кінець рукоятки проходить крізь площу S , повинна знаходитися з того ж боку елемента dl , що й точка A .

Струм проходить не по окремих елементах провідника dl , а по цілому провіднику визначеної конфігурації. Тому вектор магнітної індукції у будь-якій точці визначається за формулою:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}. \quad (6)$$

Визначимо магнітну індукцію \vec{B} поля на осі провіднику у вигляді кільця радіусу R зі струмом I в залежності від відстані r до його центра (рис. 4).

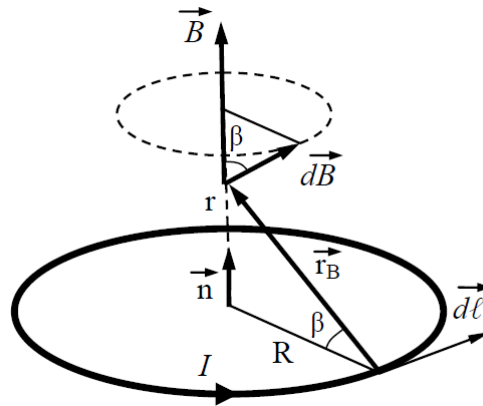


Рис. 4. Магнітне поле на осі провіднику у вигляді кільця радіусу R з постійним струмом I

Вважаємо, що на осі кільця провідник зі струмом елементарні поля $d\vec{B}$ від усіх ділянок орієнтовані під однаковим кутом β до осі. Тому перпендикулярні відносно осі складові всіх векторів $d\vec{B}$ є компенсованими, і результуючий вектор \vec{B} поля всього кільця напрямлений вздовж осі. Тому, для визначення величини B слід інтегрувати тільки осьові складові елементарних полів $dB_{\parallel} = dB \cdot \cos\beta$:

$$B = \oint d B = \oint d B \cdot \cos\beta. \quad (7)$$

Підставляємо (5) у (7), враховуємо, що $\alpha = 90^\circ$ та отримуємо:

$$B = \oint d B = \oint \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin\alpha}{r_B^2} \cdot \cos\beta = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot \cos\beta}{r_B^2} \cdot \oint dl.$$

Інтегруємо $\oint dl = 2 \cdot \pi \cdot R$ й підставляємо:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot \cos\beta}{r_B^2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot \cos\beta \cdot R}{r_B^2}. \quad (8)$$

Маємо з геометричних міркувань та теореми Піфагора (рис. 4):

$$\cos\beta = \frac{R}{r_B}, \quad r_B^2 = R^2 + r^2.$$

Після підстановки у (8) отримуємо:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot \cos\beta \cdot R}{r_B^2} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot R^2}{r_B^3} = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}}. \quad (9)$$

Магнітна індукція в центрі кільцевого провідника з постійним струмом визначається з формули (9) при $r=0$:

$$B_0 = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{I}{R}. \quad (10)$$

Остаточно з урахуванням (9) та (10) можна записати залежність зміни величини магнітної індукції магнітного поля на осі кільцевого провідника з постійним струмом від відстані від центру кільця:

$$B = B_0 \cdot \frac{R^3}{(R^2 + r^2)^{3/2}}. \quad (11)$$

Припускаючи, що закономірність зміни величини магнітної індукції магнітного поля не залежить від джерела його походження (електричний струм або постійний магніт), вважаємо, що для магніту у вигляді диску магнітна індукція буде змінюватися згідно закономірності (11) або:

$$B = B_0 \cdot \frac{D^3}{(D^2 + 4 \cdot r^2)^{3/2}}. \quad (12)$$

де B_0 – залишкова магнітна індукція магніту, Тл; r – відстань від робочої поверхні магніту, м.

На рис. 5 побудовано залежність відсотку залишку магнітної індукції $B_{\%} = 100 \cdot B$ від відстані r від робочої поверхні для магніту у формі диску, намагніченого аксіально, діаметром $D=30, 60, 70, 100$ мм. Залежність отримано за формулою (12).

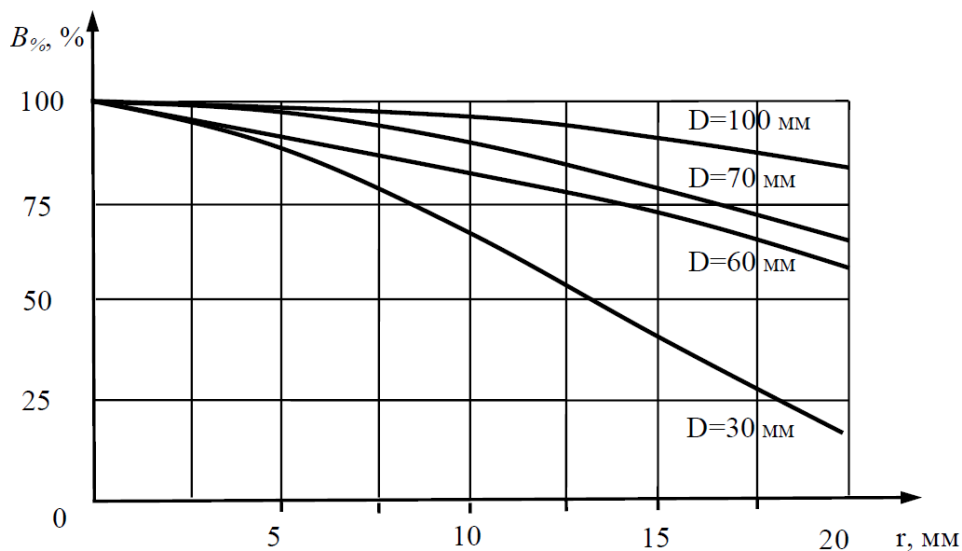


Рис. 5. Залежність відсотку залишку магнітної індукції $B_{\%}$ від відстані r від робочої поверхні для магнітів у формі диску діаметром $D=100, 70, 60, 30$ мм

Як правило, вибухонебезпечний предмет має форму, що не має плоских поверхонь. Наприклад, артилерійський снаряд (постріл) має циліндричну форму. Тому ідеальне торкання поверхні вибухонебезпечного предмету до робочої поверхні магніту, як правило, неможливе – з'являється повітряний проміжок складної форми. Слід очікувати, що чим менший повітряний проміжок, тим більша підйомна сила, й, навпаки, чим більший повітряний проміжок, тим менша підйомна си-

ла магніту. На рис. 6 показаний поперечний переріз магніту у формі диску діаметром D , що підіймає металевий циліндр діаметром D_s (при $D < D_s$). Металевий циліндр діаметром D_s є еквівалентом корпусу артилерійського снаряду (пострілу) калібром D_s .

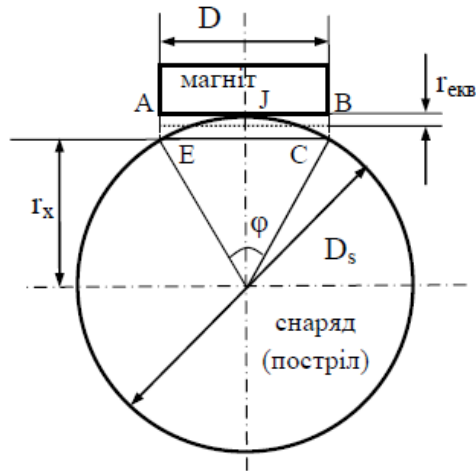


Рис. 6. Поперечний переріз магніту діаметром D , що підіймає металевий циліндр діаметром D_s (при $D < D_s$)

Оцінимо величину еквівалентної повітряної відстані $\gamma_{екв}$ між робочими поверхнями магніту діаметром D та металевого циліндру діаметром D_s .

З геометричних міркувань [19]:

$$\gamma_{екв} \approx \frac{S_{ABCE} - S_{EJC}}{D}, \quad (13)$$

де $S_{ABCE} = D \cdot \left(\frac{D_s}{2} - r_x\right)$ – площа прямокутника $ABCE$, m^2 ; $S_{EJC} = \frac{1}{8} \cdot D_s^2 \cdot (\varphi - \sin\varphi)$ – площа сегменту EJC , m^2 ; D – діаметр магніту, m ; D_s – діаметр металевого циліндру (калібр артилерійського снаряду (пострілу)), $r_x = \frac{1}{2} \sqrt{D_s^2 - D^2}$, m ; φ – кут, укладений між радіусами, проведеними до кінців хорди сегмента, град, $\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{D}{D_s}$.

Після елементарних перетворень отримуємо:

$$S_{ABCE} = \frac{D}{2} \cdot (D_s - \sqrt{D_s^2 - D^2}), \quad (14)$$

$$S_{EJC} = \frac{1}{8} \cdot D_s^2 \cdot \left(2 \cdot \arcsin \frac{D}{D_s} - \sin\left(2 \cdot \arcsin \frac{D}{D_s}\right)\right). \quad (15)$$

Залежності еквівалентної повітряної відстані $\gamma_{екв}$ між робочими поверхнями магніту у формі диску та металевого циліндру діаметром D_s від діаметру D магніту для різних діаметрів D_s металевого циліндру, які мають параболічний характер, показують, що при збільшенні діаметру D магніту збільшується і величина еквівалентної повітряної відстані $\gamma_{екв}$.

7. Обговорення результатів моделювання, що враховує особливості геометричної форми вибухонебезпечних предметів

З рис. 1 видно, що величина магнітної індукції, необхідна для підйому вантажів за допомогою магніту, залежить від площини його робочої поверхні (башмаків) за законом, близьким до гіперболічного. З рис. 2 та формули (2) можна визначити параметри магніту, необхідні для підйому вантажу. Наприклад, якщо потрібно підняти вантаж масою $F=60$ кг, знаходимо, що магніт має характеризуватися магнітною індукцією $B = 1,25$ Тл та мати площу робочої поверхні не менше $S = 0,001 \text{ м}^2$. З табл. 1 обираємо неодимовий магніт класу N40 у формі диску, що намагнічений аксіально. Його діаметр має бути не меншим $D \geq \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001}{\pi}} = 0,036 \text{ м}$. Найбільш застосовні пошукові неодимові магніти діаметром 50 мм^2 , 60 мм^2 , 70 мм^2 , 100 мм^2 . Звертаємо увагу, що розрахунок проведений для магніту, плоска робоча поверхня якого ідеально щільно торкається плоскій площині вантажу.

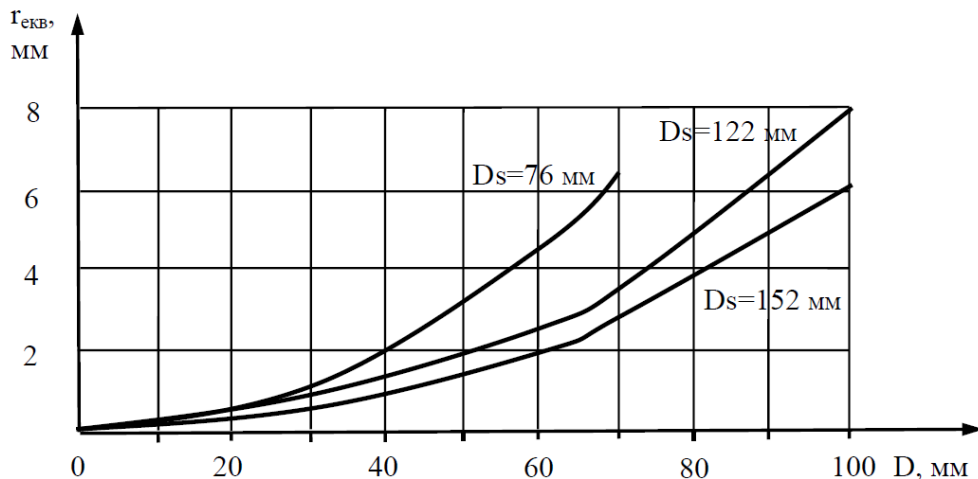


Рис. 7. Залежності еквівалентної повітряної відстані $r_{\text{екв}}$ між робочими поверхнями магніту у формі диску та металевого циліндру діаметром D_s від діаметру D магніту для різних діаметрів D_s металевого циліндру

Враховуючи, що закономірність зміни величини магнітної індукції магнітного поля за межами магніту не залежить від джерела його походження (вантажопідйомний електромагніт на постійному електричному струмі або постійний магніт), з використанням закону Біо і Савара-Лапласа отримано, що магнітна індукція за межами магніту у формі диску буде змінюватися згідно закономірності $\frac{D^3}{(D^2 + 4 \cdot r^2)^{3/2}}$ (де D – діаметр магніту, r – відстань від робочої поверхні магніту) (рис. 5). Чим більшим є діаметр магніту, тим повільніше зменшується магнітна індукція при віддаленні від магніту.

З рис. 7 видно, що залежності еквівалентної повітряної відстані $r_{\text{екв}}$ між робочою поверхнею магніту у формі диску, намагніченого аксіально, та поверхнею металевого циліндру (еквіваленту корпусу артилерійського снаряду (пострілу)) від діаметру D магніту для усіх досліджених діаметрів D_s металевого циліндру (калібрів артилерійських снарядів (пострілів)) мають параболічний характер. При

збільшенні діаметру D_s металевого циліндру для фіксованого значення діаметру D магніту еквівалентна повітряна відстань $r_{\text{екв}}$ зменшується.

З рис. 1 (формула (2)), рис. 5 (формула (12)) та рис. 7 (формули (13–15)) можна зробити конкретні рекомендації щодо вибору пошукового неодимового магніту для підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів циліндричної форми, наприклад, артилерійських снарядів (пострілів).

Для підйому на поверхню води 152 мм касетного артилерійського снаряду 3-О-13 з осколковими бойовими елементами вагою $F=57,6$ кг застосовується пошуковий неодимовий магніт діаметром $D=100$ мм класу N40. З рис. 7 (формули (13–15)) для магніту діаметром $D=100$ мм еквівалентна відстань повітряного проміжку складає $r_{\text{екв}} \approx 6,0$ мм. З рис. 5 (формула (12)) на відстані $r \approx 6,0$ мм залишкова магнітна індукція магніту дорівнює $B_{\%} \approx 97\%$. З табл. 1 неодимовий магніт класу N40 має залишкову магнітну індукцією $B=1,25$ Тл. Реальна магнітна індукція складе $B_p = 0,97 \cdot 1,25 \approx 1,20$ Тл. З рис. 1 (формула (2)) мінімальна площа робочої поверхні магніту має складати не менше $S = 0,001 \text{ м}^2$ (для магніту у вигляді диску мінімальний діаметр диску $D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001}{\pi}} = 0,036 \text{ м}$).

Робимо висновок, що за допомогою пошукового неодимового магніту діаметром $D=100$ мм класу N40 можна підняти з води на поверхню 152 мм касетний артилерійський снаряд 3-О-13 з осколковими бойовими елементами вагою $F=57,6$ кг.

Для підйому на поверхню води 122 мм осколково-фугасного снаряду ОФ-462Ж вагою $F=21,76$ кг застосовується пошуковий неодимовий магніт діаметром $D=70$ мм класу N40. З рис. 7 (формули (13–15)) для магніту діаметром $D=70$ мм еквівалентна відстань повітряного проміжку складає $r_{\text{екв}} \approx 3,5$ мм.

З рис. 5 (формула (12)) на відстані $r \approx 3,5$ мм залишкова магнітна індукція магніту дорівнює $B_{\%} \approx 97\%$. З табл. 1 неодимовий магніт класу N40 має залишкову магнітну індукцією $B=1,25$ Тл. Реальна магнітна індукція складе $B_p = 0,97 \cdot 1,25 \approx 1,20$ Тл. З рис. 1 (формула (2)) мінімальна площа робочої поверхні магніту має складати не менше $S = 0,0004 \text{ м}^2$ (для магніту у вигляді диску міні-

мальний діаметр диску $D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0004}{\pi}} = 0,023 \text{ м}$). Робимо висновок, що за допомогою пошукового неодимового магніту діаметром $D=70$ мм класу N40 можна підняти з води на поверхню 122 мм осколково-фугасного снаряду ОФ-462Ж вагою $F=21,76$ кг.

8. Висновки

1. Проведені дослідження можливості застосування пошукових неодимових магнітів для підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів. Неодимові магніти є найбільш потужними постійними магнітами. Показано, що величина магнітної індукції, необхідна для підйому вантажів за допомогою магніту, залежить від площини його робочої поверхні (башмаків) за законом, близьким до гіперболічного. Враховуючі, що магнітна проникність води дорівнює $\mu \approx 0,999991$, вода незначно послаблює магнітне поле, яке крізь неї проходить,

та водне середовище не впливає суттєво на магнітні властивості магніту за умов його належної гідроізоляції (неодимові магніти є вразливим до корозії). Під час гуманітарного підводного розмінування досить часто зустрічаються вибухонебезпечні предмети у вигляді артилерійських снарядів (пострілів) малого (20–75 мм) та середнього (76–152 мм) калібрів. Артилерійські снаряди (постріли), виготовлені з феромагнітних матеріалів, можуть бути вилучені з води за допомогою магнітів з відповідними параметрами. Артилерійські снаряди (постріли) малого та середнього калібрів мають максимальну довжину до 0,63 м та масу до $F=60$ кг.

2. Побудовано модель, що описує особливості підйому на поверхню води вибухонебезпечних предметів циліндричної геометричної форми (артилерійських снарядів (пострілів)) за допомогою пошукових неодимових магнітів. Враховуючи, що закономірність зміни величини магнітної індукції магнітного поля за межами магніту не залежить від джерела його походження (вантажопідйомний електромагніт на постійному електричному струмі або постійний магніт), з використанням закону Біо і Савара-Лапласа отримано, що магнітна індукція на відстані r від робочої поверхні магніту у формі диску діаметром D буде змінюватися згідно закономірності $\frac{D^3}{(D^2 + 4 \cdot r^2)^{3/2}}$. Чим більшим є діаметр магніту, тим повільніше змен-

шується магнітна індукція при віддаленні від магніту. З геометричних міркувань визначено, що величина еквівалентної повітряної відстані між робочою поверхнею магніту у формі диску, намагніченого аксіально, та металевого циліндру (еквіваленту корпусу артилерійського снаряду (пострілу)) від діаметру магніту для усіх досліджених діаметрів металевого циліндру (артилерійських снарядів (пострілів) малого та середнього калібрів) має параболічний характер. При збільшенні діаметру металевого циліндру (калібру артилерійського снаряду (пострілу)) для фіксованого значення діаметру магніту еквівалентна повітряна відстань зменшується. Зроблені конкретні рекомендації щодо вибору пошукового неодимового магніту для підйому на поверхню води артилерійських снарядів калібром 152 мм та 122 мм. Для перевірки адекватності побудованої моделі та підтвердження достовірності отриманих результатів є необхідним проведення експериментальних досліджень, що заплановано.

Література

1. Willa R., Szpak A. Toxic ticking time-bomb in the Baltic Sea and threats to Poland's security. Polish Political Science Yearbook. 2022. Vol. 51. P. 1–18. doi: 10.15804/ppsy202233
2. State Agency of Water Resources of Ukraine. URL: <https://www.unccd.int/resources/knowledge-sharing-system/state-agency-water-resources-ukraine>
3. Demz Company. URL: <https://demz.org/en/>
4. WOKO Magnet- und Anlagenbau GmbH. URL: <https://www.woko.de/de>
5. Zhe J. Stilwell Electronics. NdFeB magnet URL: <https://www.zjstilwell.com/Products.html>
6. Smith J. O. International Mine Action Standard for Addressing Underwater Explosive Ordnance. Marine Technology Society Journal. 2016. Vol. 50(6). P. 10–14. doi: 10.4031/MTSJ.50.6.3
7. Kłos R. Design of mine warfare diving technology: Standardisation requirements. Polish Hyperbaric Research. 2022. Vol. 78. Issue 1. P. 7–30. doi: 10.2478/phr-2022-0001

8. Vanninen P., Östin A., Beldowski J., Pedersen E., Söderström M., and others. Exposure status of sea-dumped chemical warfare agents in the Baltic Sea. *Marine Environmental Research*. 2020. Vol. 161. P. 105–112. doi: 10.1016/j.marenvres.2020.105112

9. Gotori A. R., Chandan A. G., Bhargav B. M., Vijayakumar S. Landmine Detection and Underwater Mine Analysis. In 2023 7th International Conference on Design Innovation for 3 Cs Compute Communicate Control (ICDI3C), IEEE. 2023. P. 158–162. doi: 10.1109/ICDI3C61568.2023.00041

10. Diana M., Munteanu N., Munteanu D., Cristea D. S. Marine mine detection using deep learning. In 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) IEEE. 2022. P. 237–243. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931775

11. Soloviev I. Mathematical Model Of Underwater Demining By Dipper Divers Of The SESU: Array. *Municipal economy of cities. Series: «Economy science»*. 2021. Vol. 6(166). P. 175–183. doi: 10.33042/2522-1809-2021-6-166-175-183

12. Torsten F., Beldowski J., Maser E. Explosive Ordnance in the Baltic Sea: New Tools for Decision Makers. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2022. Vol. 23. Issue 3. Article 11. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss3/11>

13. Strelets V., Hrytsaienko M., Soloviev I., Strelec V. The peculiarities prevention emergency analysis abroad associated with the underwater location of explosives. *Social Development and Security*. 2023. Vol. 13(3). P. 164–183. doi: 10.33445/sds.2023.13.3.11

14. Onțică A., Gördeş A. The Role Of Explosive Ordnance Disposal Divers In Eliminating The Danger Generated By Naval Mines. *Land Forces Academy Review*. 2024. Vol. 29(2). P. 219–226. doi: 10.2478/raft-2024-0023

15. Magnet. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Magnet>

16. Смирнов О. М., Бондар О. В., Матухно В. В., Гассієв С. Д., Поліщук Д. В. Загальна будова вибухонебезпечних предметів: навч. пос. Том II. Х.: НУЦЗУ, 2023. 489 с.

17. Purcell E, Morin D. *Electricity and Magnetism*. Cambridge: University press. 2013. P. 200. URL: <https://cambridge.org/Purcell-Morin>

18. Relative magnetic permeability. URL: https://www.e-magnetica.pl/doku.php/relative_magnetic_permeability

19. Musiol G., Semendyayev K., Mühlhig H., Bronshtein I. *Handbook of Mathematics*. Springer Berlin. Heidelberg. 2015. P. 1207. doi: 10.1007/978-3-662

O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory

M. Kustov, DSc, Professor, Head of Research Laboratory

Ye. Makarov, PhD, Deputy Head of the Department

S. Stepanchuk, Senior Lecturer of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

A MODEL FOR THE RECOVERY OF EXPLOSIVE OBJECTS BY SEARCH NEODYMIUM MAGNETS DURING UNDERWATER DEMINING

The possibility of using search neodymium magnets for lifting explosive objects to the water surface has been investigated. It has been shown that the magnitude of the magnetic induction required to lift loads using a magnet depends on the plane of its working surface according to a law close to hyperbolic. Considering that the magnetic permeability of water is close to 1, water slightly weakens

the magnetic field passing through it, and the water environment does not significantly affect the magnetic properties of the magnet under the conditions of its proper waterproofing. A model has been constructed that describes the features of lifting explosive objects of cylindrical geometric shape (artillery shells (shots)) to the water surface using search neodymium magnets. Taking into account that the pattern of change in the magnitude of the magnetic induction of the magnetic field outside the magnet does not depend on the source of its origin, it was obtained that the magnetic induction at a distance r from the working surface of a magnet in the form of a disk with a diameter D , magnetized axially. The larger the diameter of the magnet, the slower the magnetic induction decreases with distance from the magnet. From geometric considerations, it was determined that the value of the equivalent air distance between the working surfaces of a magnet in the form of a disk, magnetized axially, and a metal cylinder (equivalent to the body of an artillery shell (shot)) from the diameter of the magnet for all investigated diameters of the metal cylinder (artillery shells (shots) of small and medium calibers) has a parabolic character. As the diameter of the metal cylinder (caliber of the artillery shell (shot)) increases for a fixed value of the magnet diameter, the equivalent air distance decreases. Specific recommendations are made on the selection of a search neodymium magnet for raising artillery shells of caliber 152 mm and 122 mm to the water surface.

Keywords: explosive object, underwater demining, coercive force, magnetic induction, neodymium magnet

References

1. Willa, R., Szpak, A. (2022). Toxic ticking time-bomb in the Baltic Sea and threats to Poland's security. *Polish Political Science Yearbook*, 51, 1–18. doi: 10.15804/ppsy202233
2. State Agency of Water Resources of Ukraine. Available at: <https://www.unccd.int/resources/knowledge-sharing-system/state-agency-water-resources-ukraine>
3. Demz Company. Available at: <https://demz.org/en/>
4. WOKO Magnet- und Anlagenbau GmbH. Available at: <https://www.woko.de/de>
5. Zhe, J. Stilwell Electronics. NdFeB magnet. Available at: <https://www.zjstilwell.com/Products.html>.
6. Smith, J. O. (2016). International Mine Action Standard for Addressing Underwater Explosive Ordnance. *Marine Technology Society Journal*, 50(6), 10–14. doi: 10.4031/MTSJ.50.6.3
7. Kłos, R. (2022). Design of mine warfare diving technology: Standardisation requirements. *Polish Hyperbaric Research*. 78(1), 7–30 doi: 10.2478/phr-2022-0001
8. Vanninen, P., Östin, A., Beldowski, J., Pedersen, E., Söderström, M. (2020). Exposure status of sea-dumped chemical warfare agents in the Baltic Sea. *Marine Environmental Research*, 161, 105112, doi: 10.1016/j.marenvres.2020.105112
9. Gotori, A. R., Chandan, A. G., Bhargav, B. M., Vijayakumar, S. (2023). Landmine Detection and Underwater Mine Analysis. In 2023 7th International Conference on Design Innovation for 3 Cs Compute Communicate Control (ICDI3C), IEEE, 158–162. doi: 10.1109/ICDI3C61568.2023.00041
10. Diana, M., Munteanu, N., Munteanu, D., Cristea, D. S. (2022). Marine mine detection using deep learning. In 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) IEEE, 237–243. doi: 10.1109/ICSTCC55426.2022.9931775
11. Soloviev, I. (2021). Mathematical Model of Underwater Demining By Dipper Divers of the SESU: Array. *Municipal economy of cities. Series: «Economy science»*, 6(166), 175–183. doi: 10.33042/2522-1809-2021-6-166-175-183
12. Torsten, F., Beldowski, J., Maser, E. (2022). Explosive Ordnance in the Baltic Sea: New Tools for Decision Makers. *The Journal of Conventional Weapons*

Destruction, 23(3), 11. Available at: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss3/11>

13. Strelets, V., Hrytsaienko, M., Soloviov, I., Strelec, V. (2023). The peculiarities prevention emergency analysis abroad associated with the underwater location of explosives. *Social Development and Security*, 13(3), 164–183. doi: 10.33445/sds.2023.13.3.11

14. Onțică, A., Gördeş, A. (2024). The Role Of Explosive Ordnance Disposal Divers In Eliminating The Danger Generated By Naval Mines. *Land Forces Academy Review*, 29(2), 219–226. doi: 10.2478/raft-2024-0023

15. Magnet. Available at: <https://commons.wikimedia.org/wiki/Magnet>

16. Smirnov, O. M., Bondar, O. V., Matukhno, V. V., Gassiev, S. D., Polishchuk, D. V. (2023). *Zagalna budova vibukhonebezpechnikh predmetiv*, 489.

17. Purcell, E., Morin, D. (2013). *Electricity and Magnetism*. Cambridge: University press, 200. Available at: <https://cambridge.org/Purcell-Morin>

18. Relative magnetic permeability. Available at: https://www.e-magnetica.pl/doku.php/relative_magnetic_permeability

19. Musiol, G., Semendyayev, K., Mühlig, H., Bronshtein, I. (2015). *Handbook of Mathematics*. Springer Berlin. Heidelberg, 1207. doi: 10.1007/978-3-662-46221-8_16

Надійшла до редколегії: 13.03.2026

Прийнята до друку: 18.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026