



І. С. Афтаназів, О. І. Строган, А. О. Шевчук

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

ПОШУК БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ ПЛАВУЧИХ МІН

Наведено результати дослідження, спрямованого на вдосконалення методів пошуку та пошукового устаткування для виявлення плавучих мін в акваторіях річок, великих водойм і морів. Запропоновано для підвищення ефективності пошукових робіт поєднати пошукові можливості безпілотних літальних апаратів із спроможністю до розмінування плавучих мін катерів-тралівників. Встановлено, що оптимальною траєкторією пошукових переміщень літальних апаратів є польоти на висотах до 50 м по спіралі Архімеда. Визначено доцільну кількість літальних апаратів, що одночасно здійснюють пошуки плавучих мін. З'ясовано, що найдієвішим із варіантів знешкодження виявлених плавучих мін є їх підірвання боєзарядами, скинутими із літального безпілота-ліквідатора. Досліджено, що для уточнення координат розташування плавучих мін доцільною і найефективнішою для застосування є методика кінематичного проєктування. Розроблено алгоритм використання кінематичного проєктування для пошуку плавучих мін, який передбачає формування базової площини та призначення у товщі морських глибин "картинної" площини проєкцій, на котру проєктуватимуться проєкційовальні промені. Як об'єкт проєкціювання тут застосовано розшукувану міну. Вперше розроблені математичні залежності для уточнення координат просторового розташування виявлених мін пов'язують між собою віддалі до міни від пошукового катера-тралівника із числовими значеннями координат міни у запропонованій системі Декартових координат. Встановлено, що застосування методики кінематичного проєкціювання та безпілотних літальних апаратів для пошуку мін дає змогу не тільки здійснювати розвідувальні роботи без участі в пошуках людей, а й підвищити продуктивність і швидкість пошукових робіт. Доведено, що за швидкостей просторових переміщень пошукових літальних апаратів $5 \div 5,5$ м/с, використовуючи запропоновану схему пошуку, можна щогодинно обстежувати до 6 км^2 акваторії моря, зекономивши при цьому до 20 л вартісного палива завдяки зменшенню переміщень катера-тралівника.

Ключові слова: розмінування; катер-тралівник; кінематичне проєкціювання; дрон; координати; море; розрахунок; проєкційовальний промінь.

Вступ / Introduction

Новітні матеріали та вибухові речовини, сучасні можливості сприйняття, опрацювання та реагування на електромагнітні, акустичні та шумові збурення морської поверхні кораблями чи підводними човнами, перетворюють мінування на грізну зброю активного реагування.

Переважаючі і надалі широко застосовують для розмінування та протравлювання поверхні моря спеціальні катери-тралівники. Історія використання катерів-тралівників для знешкодження плавучих та якірних мін сягає майже століття. Започаткування їх використання практично збігається із періодом початку активного мінування морських портів і рейдів. Однак на сьогодні навіть такий давній метод розмінування зазнає модернізації та вдосконалення. Ці вдосконалення полягають в оснащенні тралівників безпілотними плавучими та літальними апаратами для пошуків мін, а також зарядами із

дистанційним керуванням для їх підірвання.

Треба відзначити, що на відміну від якірних та донних мін, встановлення яких неодмінно супроводжується фіксацією місць закріплення на відповідних картах мінування тої чи іншої морської акваторії, розміщення плавучих мін не фіксується і постійно видозмінюється вітрами та течіями, а також хвилювим збуренням морської поверхні. Понад це навіть виявлена, але вчасно не знешкоджена, плавуча міна зберігає небезпеку, оскільки не фіксується на місці виявлення та продовжує переміщатися у воді.

Певну небезпеку плавучі міни становлять не тільки для кораблів, а і для цивільного населення на морських узбережжях. Прибиті хвилями до мілин берегової лінії ці міни можуть вибухати навіть від ударного контакту із морським дном берегової мілини. І їх вибухи на берегових мілинах загрожують життю та здоров'ю працівників чи відпочивальників на узбережжі [3]. Тому акту-

Інформація про авторів:

Афтаназів Іван Семенович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри нарисної геометрії та графіки.

Email: ivan.s.aftanaziv@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3484-7966>

Строган Орія Іванівна, канд. техн. наук, ст. викладач, кафедра нарисної геометрії та графіки.

Email: orysia.i.strohan@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1790-6736>

Шевчук Анжела Олександрівна, ст. викладач, кафедра нарисної геометрії та графіки.

Email: anzhele.o.shevchuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8963-4082>

Цитування за ДСТУ: Афтаназів І. С., Строган О. І., Шевчук А. О. Пошук безпілотними літальними апаратами плавучих мін.

Науковий вісник НЛТУ України. 2023, т. 33, № 3. С. 83–89.

Citation APA: Aftanaziv, I. S., Strogan, O. I., & Shevchuk, A. O. (2023). Search of floating mines by pilotless aircrafts. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(3), 83–89. <https://doi.org/10.36930/40330312>

альною є проблема вдосконалення методів пошуку та знешкодження морських мін усіх типів та різновидів, зокрема і плавучих мін.

Об'єкт дослідження – способи ефективного пошуку мін у морських глибинах і у водах великих прісноводних водойм.

Предмет дослідження – методика визначення та розрахунків координат просторового розташування мін в акваторіях морських глибин.

Мета роботи – розробити методику пошуку і визначення координат морських мін різних типів і просторово-глибинного розташування.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- розробити методику визначення координат просторово-глибинного розташування морських мін засобами кінематичного проєкціювання;
- створити принципову схему оптимальних переміщень пошукового катера-тралівника і допоміжного плавучого засобу для збільшення площ ефективного пошуку морських мін;
- створити алгоритм програмного забезпечення для розроблення програми розрахунку і узгодження даних пошукових плавучих засобів для визначення координат місця розташування міни.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найефективнішими для розмінування великих площ морської акваторії як у минулому, так і на сьогодні є морські самохідні трали. Це переважно катери, корпуси яких спеціально адаптовані до того, щоб витримувати навантаження від вибухів мін [4]. Історія використання катерів-тралівників для знешкодження плавучих та якірних мін сягає понад століття. Започаткування їх використання практично збігається із періодом початку активного мінування морських водойм. Сучасний катер-тралівник – це переважно розбірний понтонний катер зі швидкістю руху 6-10 вузлів, який можна швидко перетранспортувати літаком у потрібну точку світу. Прикладом сучасних катерів-тралівників є шведський SAM-3 і американський SAM-05. Однак у сьогоденні навіть такий давній метод розмінування зазнає модернізації та вдосконалення. Переважно ці вдосконалення полягають в оснащенні тралівників безпілотними плавучими та літальними апаратами для пошуку мін, до того ж оснащених підвісними зарядами із дистанційним керуванням для їх підірвання.

Для пошуку та знешкодження самонавідних мін найчастіше на катер-тралівник встановлюють різноманітні імітатори шумів, вібрацій і магнітних полів, що роблять його схожим для мін на типовий військовий корабель. У роботі [3] відзначено, що оснащена рядом понтонів-імітаторів сигналів і шумових двигунів така "гірлянда" спроможна доволі активно збурювати різноманітні самонавідні міни, провокуючи їх спливання на поверхню для ураження уявної цілі. Ті ж міни, що спливали на поверхню моря, доволі легко захопити тралом та згодом знешкодити. Або ж дистанційно підірвати, наприклад, дроном-ліквідатором із підвісним дистанційно керованим боезарядом.

Водночас, не втрачають своєї актуальності наукові пошуки в руслі вдосконалення наявних та створення новітніх більш прогресивних методів пошуку мін. Так, автори робіт [8, 10, 11] схилиються до переконання, що найефективнішим було б використання для пошуків морських мін літальних апаратів. Розширити їх технологічні можливості, на переконання авторів роботи [11],

могли б методики, що базуються не тільки на можливостях пошукової апаратури, а і на застосуванні математичного апарату та практично невичерпних спроможностей сучасної обчислювальної техніки [8, 11, 12].

Автори робіт [13, 14] відзначають, що певні перспективи у цьому контексті спостерігаються у спроможності долучити до пошукових методів визначення координат морських мін методик сучасної нарисної геометрії, а саме її складової, що відома під назвою "кінематичне проєкціювання". Під "кінематичним проєкціюванням (відображенням)" розуміють проєкціювання, за якого всі його складові елементи, а саме центр проєкціювання, фокальні фігури проєкціювальних комплексів і конгруенцій, об'єкти проєкціювання (прообрази) та носії проєкцій ("картинна площина") можуть здійснювати взаємозалежні просторові переміщення у просторі і часі [1, 14]. Найяскравішим прикладом успішного використання кінематичного проєкціювання для відстежування траєкторій та координат просторових переміщень рухомих об'єктів є успішні дослідження геометрів НУ "Львівська політехніка" з визначення координат безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1, 13]. Унаслідок цих досліджень створено теоретичну базу математичного апарату розрахунку засобами кінематичного проєкціювання координат та траєкторій просторових переміщень ворожих диверсійно-розвідувальних БПЛА. Експериментальна перевірка підтвердила високу ефективність та точність визначення просторових координат рухомих об'єктів засобами кінематичного проєкціювання [6, 16].

Варто відзначити, що на відміну від якірних і донних мін, встановлення яких неодмінно супроводжується фіксацією місць закріплення на відповідних картах мінування тої чи іншої морської акваторії, розміщення плавучих мін не фіксується і постійно видозмінюється вітрами та течіями, а також хвилювими збуреннями морської поверхні. Понад це навіть виявлена, але часом не знешкоджена, плавуча міна зберігає небезпеку, оскільки не фіксується на місці виявлення та продовжує переміщатися у воді.

Певну небезпеку плавучі міни становлять не тільки для кораблів, а і для цивільного населення на морських побережжях. Прибиті хвилями до мілин берегової лінії ці міни можуть вибухати навіть від ударного контакту із морським дном берегової мілини. І їх вибухи на берегових мілинах загрожують життю та здоров'ю працівників чи відпочивальників на побережжі.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Проведений аналіз застосовування різноманітних засобів для пошуку та знешкодження плавучих мін переконливо підводить до думки та переконання, що найоптимальнішим буде органічне поєднання переваг застосування морських плавучих засобів та літальної техніки [4, 8]. У разі плавучих мін це повинно б бути поєднання одночасного застосування катерів-тралівників із безпілотними літальними апаратами (БПЛА). На катері-тралівнику, наприклад моделі ARCIS Atlas Elektronik, повинні бути облаштовані командний пункт із засобами керування пошуковими переміщеннями літальних апаратів та програмним забезпеченням розрахунків координат виявлених мін, радіолокаційна станція (РЛС) для відстежування БПЛА, майданчик для запуску та посад-

ки літальних апаратів і звичайно спорядження для дистанційного знешкодження виявлених мін [3, 10, 11].

У ролі пошукових літальних апаратів доречно скористатися дронами чи квадрокоптерами середніх типорозмірів, що спроможні транспортувати на собі переносне радіолокаційне обладнання масою до 40 кг із ефективним радіусом дії 200-250 м та обладнанням візуалізації і спостереження за поверхнею моря із високою роздільною здатністю та радіусом дії не менше 100 м [8, 10]. У разі потреби підірвати виявлені міни ці літальні апарати повинні бути оснащені дистанційно керованими тримачами бойових зарядів. Таким вимогам відповідає доволі багато різновидів безпілотників, наприклад, моделей "Predator-B" (фірма "General Atomic Aeronautical Systems Inc", США), "Grand Duck" ("Dasso", Франція) тощо. Та найефективнішим, на нашу думку, було б використання для ліквідації виявлених мін малогабаритного дрона-ліквідатора моделі Switchblade 600. Його перевагою, окрім невеликої маси та розмірів, є наявність GPS-навігації і здатність пошуку та розпізнавання наперед заданих об'єктів. Вагомою є і здатність цього дрона-камікадзе до 30 хв безперервного польоту із крейсерською швидкістю 112 км/год.

Розмінування морської акваторії від плавучих мін із використанням безпілотних апаратів здійснюють у такій послідовності. Катер-тралівник 1 із завантаженими на нього чотирма БПЛА 2 типу "дрон", що оснащені зазначеним вище пошуковим обладнанням, а також вибуховими зарядами для підризу виявлених мін, заходить в центральну частину виділеної йому для пошуків мін ділянки акваторії моря (рис. 1).

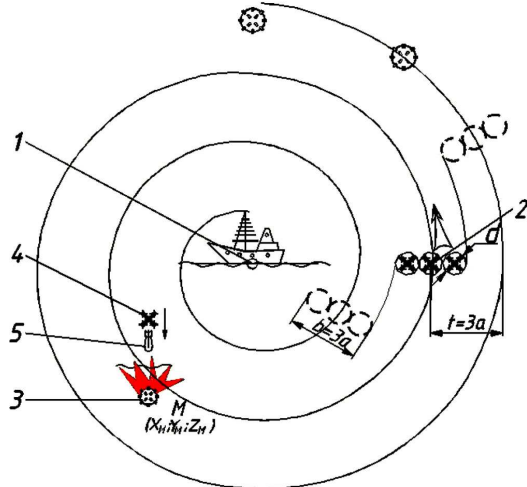


Рис. 1. Траєкторія просторових переміщень пошукових дронів по спіралі Архімеда / Trajectory of spatial movements of search drones along the Archimedean spiral

Тут він стає на якор, якщо це прийнятна глибина моря, або повільно дрейфує, час від часу відкореговуючи своє місце розташування поблизу центра пошукової ділянки. У небо почергово запускають три дрони 2 із радіолокаційною пошуковою апаратурою та спостережувальними відеокамерами. Командний пункт керування пошуковими роботами за допомогою відповідних комп'ютерних програм керування пошуковими переміщеннями на першому етапі вилаштує трійку дронів у одну лінію на віддалі a один від одного та від командного пункту на катері-тралівнику 1. Віддалі a між дронами призначають рівною діаметру d півсфери ефективної дії їх пошукової радіолокаційної апаратури, тобто $a = d = 2r$, де r – радіус ефективного пошуку дрона.

Вилаштуванням в одну лінію пошуковим дронам 2 подають команду на просторові переміщення цієї трійки дронів по спіралі Архімеда, крок якої рівний

$$b = 3a = 3d = 6r,$$

де: $b = 3a$ – ширина ділянки одночасного охоплення дронами пошукової зони; d та r – відповідно діаметр і радіус півсфери дії пошукової радіолокаційної апаратури.

Траєкторію руху пошукових дронів по спіралі Архімеда обрано із двох міркувань:

- ця траєкторія не допускає наявності необстежених ділянок акваторії моря;
- ця плавна траєкторія, на відміну від інших можливих, не передбачає зворотних рухів і стрімких поворотів, що не є бажаним для літальних апаратів.

Якщо прийняти за середню допустиму швидкість лету пошукових дронів швидкість $v = 5-5,5 \text{ м/с} = 18-20 \text{ км/год.}$, то за годину часу цими трьома пошуковими дронами за просторових їх переміщень по спіралі Архімеда буде обстежено приблизно 6 км^2 акваторії моря.

Якщо виявлений на поверхні моря плаваючий предмет все ж таки виявиться плавучою міною 3, приступають до її знешкодження. Для цього використовують дрон-ліквідатор 4 із дистанційно керованим боезарядом 5 (див. рис. 1). Для цього, використовуючи відповідну програму, уточнюють координати розташування цієї міни 3. Ця програма передбачає запровадження уявної системи ортогональних просторових Декартових координат із розташуванням початку відліку координат на місці катера-тралівника 1 (рис. 2). Нумерація позицій на цьому та наступних рисунках збігається із номерами позицій на рис. 1.

Вісь x уявно спрямовують у напрямку однієї із географічних сторін світу досліджуваної ділянки пошуку мін, наприклад, на південь. Перпендикулярну їй вісь y – в напрямку іншої сторони світу, наприклад, на схід. Вісь z спрямовують вгору перпендикулярно до двох інших осей. Утворена двома взаємно перпендикулярними осями x та y горизонтальна площина проєкцій цієї системи координат збігається із поверхнею моря. Напрямки осей призначають так, щоб виявлена міна 3 та пошукові дрони 2 розташувались в межах першого октанту окресленого площинами проєкцій простору (див. рис. 2) [12].

Встановленою на катері-тралівнику 1 радіолокаційною станцією (РЛС) визначають координати кожного із розміщених над міною дронів 2 у запровадженій системі. До цих координат належить віддалі l від РЛС до кожного із трьох пошукових дронів, що на цей період часу розміщений над виявленою міною 3, а також кути нахилу уявних проєктувальних променів, що проходять від РЛС до кожного із дронів. На рис. 2 ці побудови позначено так:

- пошукові дрони № 1-А, 2-В та 3-С, а їх проєкції на площину поверхні моря – відповідно $1^1A, 1^1B, 1^1C$;
- віддалі від РЛС до пошукових дронів: $l_1 = OA$; $l_2 = OB$; $l_3 = OC$;
- проєкціювальні промені, що проходять від РЛС через пошукові дрони – p_1, p_2, p_3 . Їх проєкції на площину поверхні моря відповідно p_1^1, p_2^1, p_3^1 ;
- кути між проєктувальними променями та їх проєкціями на площину поверхні моря відповідно:

$$\varphi^0 = p_1^1 \wedge p_1 = OA \wedge O^1A \text{ (рис. 2).}$$

Подальші розрахунки координат розташування виявленої міни здійснюють, використовуючи для цього відповідне програмне забезпечення за наступним алгоритмом [12].

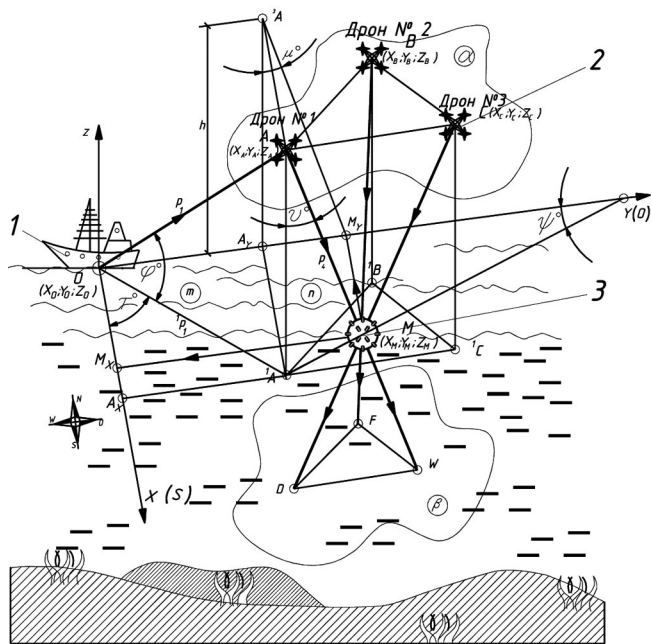


Рис. 2. Схема розрахунку координат виявленої пошуковими дронами плавучої міни / Scheme for calculating the coordinates of a floating mine detected by search drones

Спершу із відповідних трикутників ΔAO^1A , ΔBO^1B , та ΔCO^1C визначають висоту розташування дронів 2 над поверхнею моря $h = l_1 \sin \phi$ та вирівнюють її для всіх трьох дронів. Позначають утворену трьома дронами площину як базову площину $\alpha(A, B, C)$. Ця базова площина α паралельна поверхні моря і віддалена від нього на висоту $h = |\alpha^1\Pi|$.

Надалі програмою розрахунку передбачено, що із переносних радіолокаційних станцій кожного із дронів 2 уявно проведено проєкційвальні промені, що проходять безпосередньо через сам дрон та виявлену міну 3, тобто $p_4 = AM$, $p_5 = BM$, та $p_6 = CM$. Фіксують кути нахилу цих проєкційвальних променів до відповідних перпендикулярів з точок A, B та C на поверхню площини моря, тобто:

$$\begin{aligned} v^\circ &= p_4 \wedge A^1A = AM \wedge A^1A; \\ \zeta^\circ &= p_5 \wedge B^1B = BM \wedge B^1B; \\ \varepsilon^\circ &= p_6 \wedge C^1C = CM \wedge C^1C. \end{aligned}$$

Нижче поверхні моря на глибині $h_1 = h/2$ уявно об'являють програмою розрахунків ще одну паралельну поверхні моря $^1\Pi(x, y)$ та базовій площині $\alpha(A, B, C)$ так звану "картинну" площину β . Продовжують уявні проєкційвальні промені p_4, p_5 та p_6 , що проходять від пошукових дронів 2 через виявлену міну M , до перетину із "картинною" площиною β і розраховують координати їх точок перетину, зокрема:

$$\begin{aligned} W(x_W, y_W, z_W) &= \rho_4 \cap \beta \parallel ^1\Pi; \\ F(x_F, y_F, z_F) &= \rho_5 \cap \beta \parallel ^1\Pi; \\ D(x_D, y_D, z_D) &= \rho_6 \cap \beta \parallel ^1\Pi. \end{aligned}$$

Водночас, для просторової прив'язки проєкційвальних променів до обраної системи координат додатково із визначених радаром дронів 2 азимутів проєкційвальних променів визначають кут їх нахилу до будь-якої із вертикальних площин проєкцій обраної системи координат. Наприклад, профільної $^3\Pi(y, z)$, утвореної перетином осей y та z . Тоді

$$\mu^\circ = p_4 \wedge ^3\Pi; \lambda^\circ = p_5 \wedge ^3\Pi; \chi^\circ = p_6 \wedge ^3\Pi.$$

Дві утворені проєкційвальними променями p_4, p_5 та p_6 та паралельними між собою основами піраміди $MABC$ та $MWFD$ подібні між собою. Їх площини основ $\alpha(A, B, C)$ та $\beta(W, F, D)$ паралельні між собою. Ці піраміди мають спільну вершину в точці M , де розташована виявлена міна. Кути їх відповідних граней при вершині M рівні між собою, а бокові ребра одної є продовженням ребер іншої. Володіючи координатами точок A, B та C при основі верхньої піраміди $ABCM$, як даними вимірювання РЛС катера-тралівника 1, та координатами точок W, F та D при основі нижньої піраміди, як даними вимірювання радарів дронів 2, можна розрахувати шукані координати спільної вершини цих пірамід, тобто точки M як точки, у якій на даний момент розміщена виявлена плавуча міна 3.

Уявно спрямований із РЛС катера-тралівника на дрон № 1 (точка A на рис. 2) проєкційвальний промінь p_1 та його проєкція 1p_1 на горизонтальну площину проєкцій $^1\Pi$, а також лінія зв'язку між точками A та 1A формують задану трикутником ΔAO^1A площину $m(\Delta AO^1A)$, яка перпендикулярна $^1\Pi$, тобто $m(\Delta AO^1A) \perp ^1\Pi$ (x, y). За азимутом РЛС по проєкційвальному променю p_1 встановлюють кут його нахилу до $^1\Pi$, тобто $\phi^\circ = OA \wedge O^1A = p_1 \wedge ^1p_1$ і уточнюють висоту розміщення дрона № 1 (точка A) над поверхнею моря за формулою

$$z_A = h = A^1A = OA \cdot \sin \phi = l_1 \cdot \sin \phi,$$

де $l_1 = OA$ – визначена РЛС віддаль від катера-тралівника до дрона № 1.

Довжина проєкції 1p_1 проєкційвального променя p_1 на горизонтальній площині проєкцій становить

$$^1p_1 = O^1A = OA \cdot \cos \phi = l_1 \cdot \cos \phi.$$

Тоді координати точок A та 1A визначають із прямокутних трикутників Δ^1AOA_x та Δ^1AOA_y :

$$x_A = OA_x = O^1A \cdot \cos \tau = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau = h \frac{\cos \tau}{\tan \phi};$$

$$y_A = A_x^1A = OA_y = ^1p_1 \sin \tau = O^1A \cdot \sin \tau = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau = h \frac{\sin \tau}{\tan \phi},$$

де τ° – кут між $^1p_1 = O^1A$ та віссю x .

Аналогічно визначають усі координати розташування дрона № 1 (точка A), дрона № 2 (точка B) та дрона № 3 (точка C) у запровадженій системі координат:

$$\begin{aligned} x_A &= l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau; \quad x_B = l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos k; \quad x_C = l_3 \cdot \cos \delta \cdot \cos \eta; \\ y_A &= l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau; \quad y_B = l_2 \cdot \cos \gamma \cdot \cos k; \quad y_C = l_3 \cdot \cos \delta \cdot \cos \eta; \\ z_A &= l_1 \cdot \sin \phi; \quad z_B = l_2 \cdot \sin \gamma; \quad z_C = l_3 \cdot \sin \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

де: k° – кут між проєкцією проєктувального променя 1p_5 та віссю x , а кут η – це кут між проєкцією проєкційвального променя 1p_6 та віссю x .

Із розташованого в точці A дрона № 1 його переносним радаром уявно спрямовують проєкційвальний промінь p_4 на виявлену міну 3 в точці M , що лежить на поверхні моря. У нашому випадку в прийнятій системі координат точка M , тобто виявлена міна, розміщена на горизонтальній площині проєкцій $^1\Pi(x, y)$. Аналогічно попередньому випадку розглянуто проєктувальний промінь $p_4 = AM$ (див. рис. 2). Його проєкція на $^1\Pi$, тобто $^1p_4 = M^1A \subset ^1\Pi$, та лінія зв'язку A^1A формують прямокутний трикутник ΔAM^1A , площина якого $n(\Delta AM^1A)$ перпендикулярна площині проєкцій $^1\Pi$. До площини проєкцій $^3\Pi(y, z)$ площина цього трикутника нахилена під кутом ψ° . За допомогою азимута радара дрона

№ 1 визначають кут нахилу його уявного проєкціювального променя p_4 до лінії зв'язку A^1A , а саме $\nu^0 = p_4 \wedge A^1A$.

Із прямокутного трикутника ΔAM^1A визначають довжину відрізка AM

$$l_4 = AM = \frac{{}^1AA}{\sin \nu} = \frac{h}{\sin \nu}, \quad (2)$$

а із прямокутного трикутника ΔAMK визначають різницю координат точок A та M , тобто:

$$\Delta x_M = MK = {}^1AM \cdot \sin \psi = h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \sin \psi; \quad (3)$$

$$\Delta y_M = {}^1AK = {}^1AM \cdot \cos \psi = h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \cos \psi.$$

Отже, координати виявленої міни (точка M) у прийнятій системі координат матимуть такі розрахункові значення:

$$x_M = x_A \pm \Delta x_M = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \cos \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \sin \psi = h \left(\frac{\cos \tau}{\operatorname{tg} \phi} \pm \operatorname{tg} \nu \cdot \sin \psi \right);$$

$$y_M = y_A \pm \Delta y_M = l_1 \cdot \cos \phi \cdot \sin \tau \pm h \cdot \operatorname{tg} \nu \cdot \cos \psi = h \left(\frac{\sin \tau}{\operatorname{tg} \phi} \pm \operatorname{tg} \nu \cdot \cos \psi \right);$$

$$z_M = 0. \quad (4)$$

Знак "+" у наведених вище залежностях застосовують якщо кут ψ° гострий, і знак "-" — якщо він тупий. Отже, використовуючи нескладну розрахункову програму, на підставі даних, поданих із встановленої на катері-тралівнику радіолокаційної системи та даних переносних радарів на дронах, визначають координати виявленої дронами плавучої міни.

Для уточнення координат міни наведені вище розрахунки продублюють і для двох інших дронів.

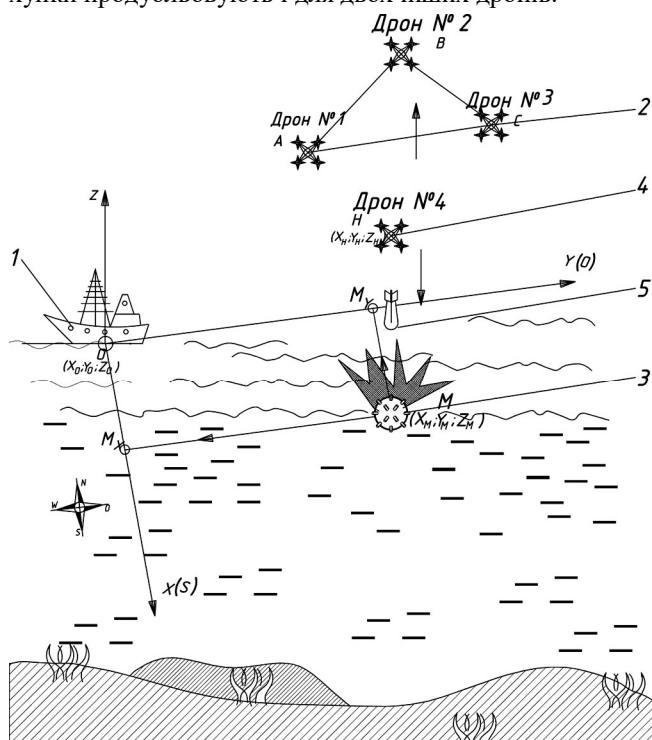


Рис. 3. Ліквідація виявленої плавучої міни / Liquidation of the detected floating mine

Надалі для знешкодження виявленої міни команда катера-тралівника приймає рішення про вибір доступного для них методу безпосереднього знешкодження. Тут можливі декілька варіантів, зокрема і підрив міни 3 із використанням БПЛА. У цьому разі використовують четвертий із наявних на катері-тралівнику 1 дронів

№ 4. В автоматичному тримачі цього дрона 4 встановлюють відповідний боезаряд 5, вибухової речовини якого достатньо для підриву виявленої міни. Дрон-ліквідатор 4 із боезарядом 5, задавши йому розраховані координати виявленої міни, спрямовують на ліквідацію міни 3 (рис. 3).

Пошукові дрони № 1, 2 та 3 піднімаються на безпечну для них висоту, дрон-ліквідатор 4 розташовується над міною 3, відеокамерою він, за змогою, черговий раз уточнює тип міни та очікує команди на подальші дії. Командний пункт кінцево проаналізовує безпеку вибуху міни 3 для довкілля, для людей та використовуваної пошукової техніки і дає команду на підривання міни. Пусковий механізм дрона-ліквідатора 4 розфіксує тримач боезаряду 5 і вибуховий заряд падає безпосередньо на міну чи поряд з нею у воду. Від ударного контакту боезаряду з міною 3 чи водою боезаряд 5 вибухає, провокуючи своїм вибухом і вибух виявленої міни завдяки її механічному ушкодженню чи детонації вибухової речовини.

Обговорення результатів дослідження. Враховуючи світові тенденції розвитку та досвіду застосування БПЛА у таких провідних з військової точки зору країнах НАТО як США, Великобританія та Туреччина, можна стверджувати, що основним напрямом їх розвитку та застосування є масоване використання як елементів повітряної компоненти системи розвідки, зв'язку, навігації та ударних систем для вирішення завдань в інтересах забезпечення обороноздатності України [2, 8]. При цьому закономірно очікувати, що поряд із головним напрямком їх застосування як засобів розвідки, буде також їх інтегроване використання для вирішення конкретних завдань виявлення та знищення наземних і морських цілей, зокрема і морських плавучих мін. На підтвердження цього світові засоби масової інформації ще навесні 2022 р. повідомили, що командування військово-морських сил Туреччини започаткувало використання безпілотних літальних апаратів для пошуку мін, які рясно розкидав Чорноморський флот Російської федерації з наміром заблокувати всі морські переміщення між Одесою та Босфором. Для цього були залучені БПЛА моделі TAI Anka, які замість оптичної станції використовують радар із синтезованою апертурою SAR. Йдеться про радар моделі MİLSAR SARMTI від Metek-san Defense, який дає змогу знаходити навіть такі малогабаритні об'єкти, як дрейфуючі міни у будь-яку погоду та незалежно від часу доби. Про використання дронів повідомила агенція оборонної промисловості Туреччини Savunma Sanayii Başkanlığı, уточнивши, що місії з пошуку дронами мін у Чорному морі розпочалися ще у квітні 2022 року.

Згідно з даними масової інформації намагаються налагодити для пошуків морських мін застосування літальних апаратів, зокрема і безпілотних, також й інші держави Чорноморського басейну, зокрема Румунія та Болгарія. Це ще раз підтверджує актуальність цього дослідження, його наукову новизну та перспективи широкого використання результатів.

На відміну від дорогих турецьких пошукових безпілотних розвідувальних літальних апаратів моделі TAI Anka, вартість яких сягає декількох сотень тисяч доларів США, запропоновані у цьому дослідженні розвідувальні пошукові дрони на порядок-півтора дешевші, до того ж надійніші в обслуговуванні. Адже для їх базу-

вання, запуску та обслуговування цілком достатньо невеликого за розмірами катера-тралівника [7, 9]. Не менш вагомим є і те, що у запропонованій схемі виявлення пошуковими дронами міна підлягає негайному знищенню дроном-ліквідатором. Це засвідчує певні перспективи у практичному використанні результатів цього дослідження для покращення обороноздатності України. Ідея застосування БПЛА для пошуку морських мін має доволі широке розповсюдження серед таких провідних з військової точки зору країн НАТО як Великобританія, Туреччина та США [5, 15].

Звичайно, як і більшість інженерних рішень, цей метод розмінування акваторії поверхні моря та річок має як свої переваги, так і свої вагомні недоліки. Незаперечно найвагомішим із недоліків є те, що він придатний тільки для плавучих мін, що дрейфують на поверхні водойми. Ні для розмінування так званих якірних мін, ні для знешкодження донних мін він, звичайно, не придатний. Непридатний тому, що переносні радары, якими споряджені пошукові дрони, неспроможні ефективно відскановувати товщу води, у якій ці міни знаходяться.

Іншим відчутним недоліком описаного методу розмінування є його критична залежність від погодних умов. Вітер із швидкістю понад 7-8 м/с, збурення хвиль заввишки понад 1,5 м, надмірна задираність повітря, інтенсивні дощові чи снігові опади – усе це унеможливує використання дронів як літальних апаратів, а відповідно – і застосування засобів кінематичного проектування для пошуку мін на поверхні моря.

Певним недоліком є і те, що виявлені у такий спосіб міни неможливо позбавити плавучості чи зафіксувати на місці їх виявлення. Тому ці виявлені плавучі міни необхідно відразу ж ліквідувати. Інакше вони можуть бути віднесені вітрами чи течіями в інші ділянки і їх пошуки доведеться розпочинати заново.

Та є дві незаперечні переваги, які властиві методиці застосування кінематичного проєкціонування для пошуку плавучих мін. Передусім, це повне усунення людей як від пошукових переміщень, так і від знешкодження мін. Це дуже важливо, бо процес розмінування не тільки довготривалий, а і вкрай небезпечний для команди катерів-тральників та водолазів.

Як позитивну особливість застосування кінематичного проєкціонування можна відзначити зведені до мінімуму пошукові переміщення катера-тралівника. Він або стоїть на якорі, або ж дрейфує із мінімальними витратами вартісного палива для роботи привідних двигунів для виявлення пошуковими дронами плавучої міни.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено принципово нову теоретично обґрунтовану методику пошуку та розрахунку координат мін у морських глибинах та водах прісноводних водойм, що ґрунтується на застосуванні засобів кінематичного проєкціонування;

Практична значущість результатів дослідження – застосування новостворених методик пошуку плавучих мін та уточненого розрахунку їх координат дає змогу приблизно вдвічі розширити акваторію пошуку мін. Як наслідок це пропорційно зменшить трудовитрати на пошукові роботи, а також затрати палива на переходи пошукового судна із одної пошукової ділянки на іншу.

Висновки / Conclusions

Унаслідок проведеного дослідження розроблено методику пошуку і визначення координат морських мін різних типів та просторово-глибинного розташування. За результатами виконаного дослідження можна зробити такі основні висновки:

1. Воєнні дії на території України, спричинені агресією Росії, зумовили інтенсивне замінування агресором не тільки суходолів нашої держави, але і морських портів, рейдів і прісноводних водойм.
2. Серед різновидів мінного озброєння, яке використовує агресор на акваторіях річок і морів, плавучі міни найнебезпечніші як для кораблів, так і для цивільного населення, що проживає, працює чи відпочиває на берегах водойм. З'ясовано, що наявні методики та засоби пошуку плавучих мін і визначення їх координат недостатньо точні та ефективні та потребують вдосконалення.
3. Розроблено новий метод пошуку та уточнення координат плавучих мін, суть якого полягає у застосуванні для пошуку мін групи безпілотних літальних апаратів типу "дрон", результати пошуків яких зводяться до розрахунків координат виявленої плавучої міни засобами кінематичного проєктування. Встановлено, що використання малогабаритних економних літальних апаратів усуває потребу в пошукових переміщеннях катерів-тральників, що відчутно здешевлює пошукові роботи, підвищує їх безпеку для командного складу катерів-тральників.
4. З'ясовано, що серед можливих варіантів траєкторій переміщень літальних апаратів та катера-тралівника у пошуках плавучих мін оптимальною є траєкторія польотів пошукових апаратів групою із трьох вилаштованих у ряд дронів по спіралі Архімеда із міжвитковим кроком, пропорційним кількості пошукових дронів та радіусу ефективної дії їх пошукової апаратури.

References

1. Aftanaziv, I. S., Svidrak, I. H., & Strohan, O. I. (2022). Determining the coordinates of unmanned aerial vehicles. *Suchasni doslidzhennia u svitovii nautsi, materialy II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Lviv, 15-17 travnia, 2022). Lviv. [In Ukrainian].
2. Alimpiev, A. M., & Pevtsov, G. V. (2017). The features of the hybrid war of the Russian Federation against Ukraine. Experience received by the Armed Forces of the Armed Forces of Ukraine. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2(27), 19–25. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.03>
3. Antonov, R. (2022). UAVs will help detect unexploded ordnance. *Military portal*. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/bpla-dopomozhut-vyavlyaty-nezdetonuvavshi-boyeprypasy/>. [In Ukrainian].
4. Apalkov, Yu. V. (2019). *Navy of the USSR and Russia. Mine defense ships*. Chast 2. SPb: Morskoe nasledie. [In Russian].
5. Fu, J. (2011). The analysis of the U. S. Navy's anti-mine capability and unmanned anti-mine platform equipment [J]. *Modern Ships*, 7, 44–47.
6. Hlotov, V., Fys, M., & Pashchetnyk, O. (2020). Development of a technique for increasing the accuracy of determining the spatial coordinates of object points during aerial photography from a UAV. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*, 92, 45–54. <https://doi.org/10.23939/istecgeap2020.92.045-54>
7. Kucherenko, Yu. F., & Nosyk, A. M. (2017). Development of unmanned aerial vehicles ways of usage. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 1(26), 30–34. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.06>
8. Kucherenko, Yu. F., Naumenko, M. V., & Kuznietsova, M. Iu. (2018). Analysis of the experience of using unmanned aerial vehicles and determining the direction of their further development in conducting network-centric operations. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 1, 25–30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.53.03>

9. Kushnir, A. I., Davykoza, A. P., & Kucherenko, J. F. (2017). The influence analysis of "hybrid" war on the development of automatic system of aviation control and anti-aircraft defense of the Armed Forces of Ukraine. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2(27), 116–120. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.27.22>
10. Lavrivskiy, M. Z., & Tur, N. Ye. (2015). The use of unmanned aerial vehicles in monitoring emergency situations in forest areas. *Scientific Bulletin of UNFU*, 25(8), 353–359. [In Ukrainian].
11. Mosov, S. (2008). Unmanned reconnaissance aircraft of the countries of the world: history of creation, experience of combat use, current state, development prospects. Kyev: RUMB [In Russian].
12. Shults, R. V., Voitenko, S. P., Krelshtein, P. D., & Malina, I. A. (2015). To the question of calculating the accuracy of determining the coordinates of points during aerial photography from unmanned aerial vehicles. *Inzhenerna heodeziia*, 62, 124–136. [In Ukrainian].
13. Svidrak, I. G., Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., & Strohan, O. I. (2022). Determination of coordinates of unmanned aircrafts by means of kinematic projection. *Mathematical Modeling and Computing*, 9(2), 459–469. <https://doi.org/10.23939/mmc2022.02.459>
14. Svidrak, I. H., Aftanaziv, I. S., Strohan, O. I., & Shevchuk, A. O. (2021). Kinematic projection in modern technologies. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho. Seriya "Kharchovi tekhnolohii"*, 23(96), 67–75. <https://doi.org/10.32718/nvivet-f9612>
15. Wang, J., Wang, H. (2021). The analysis of the development trend of antimine UAV[J]. *Digital Ocean and Underwater Offensive and Defense*, 4(2), 113–116.
16. Yanchuk, R. M., & Trokhymets, S. M. (2017). Creation of a cartographic basis for the development of general plans of settlements based on the materials of aerial photography from non-professional UAVs. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*, 1, 32–39. [In Ukrainian].

I. S. Aftanaziv, O. I. Strohan, A. O. Shevchuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

SEARCH OF FLOATING MINES BY PILOTLESS AIRCRAFTS

The results of research aimed at improving search methods and search equipment for detecting floating mines in the water areas of rivers, large reservoirs and seas are presented. To increase the efficiency of search operations, it is proposed to combine the search capabilities of unmanned aerial vehicles with the ability to clear floating mines of trawler boats. In the course of research, the optimal trajectory of search movements of aircraft is revealed to be flights at altitudes of up to 50 m along the Archimedean spiral. An appropriate number of aircraft that search for floating mines at the same time has been determined. It has been found that the most effective option for neutralizing detected floating mines is their detonation with warheads dropped from a liquidator flying drone. Moreover, the method of kinematic design is defined to be appropriate and most effective for specifying the coordinates of the location of floating mines. An algorithm for the use of kinematic projection for the search for floating mines has been developed, which involves the formation of a base plane and the designation of a "picture" projection plane in the depth of the sea, on which the projecting rays will be projected. A wanted mine is used as a projection object here. Mathematical dependencies developed for the first time to clarify the coordinates of the spatial location of detected mines relate the distance to the mine from the search trawler boat with the numerical values of the mine coordinates in the proposed system of Cartesian coordinates. The use of kinematic projection techniques and unmanned aerial vehicles to search for mines allows both performing reconnaissance work without the participation of people in the search, and also increasing the productivity and speed of search work. It has been proven that at speeds of spatial movements of search aircraft of 5÷5.5 m/s, using the proposed search scheme, it is possible to survey up to 6 square kilometers of sea water area every hour, while saving up to 20 liters of valuable fuel due to the reduction of movements of the trawler boat.

Keywords: mine clearance; trawler boat; kinematic projection; drone; coordinates; sea; calculation; projection beam.