

І.І. Соловйов

Головне управління ДСНС України у Херсонській області, Україна

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПІДВОДНОГО РОЗМІНУВАННЯ ВОДОЛАЗАМИ-САПЕРАМИ ДСНС УКРАЇНИ**

Показано, що математична модель підводного розмінування водолазом-сапером уявляє собою систему з трьох аналітичних залежностей. Перша уявляє собою функціонал, який описує процес підводного розмінування у вигляді трифакторної поліноміальної моделі. Друга дозволяє уявити цей функціонал як сукупність однофакторних моделей. Третя забезпечує визначення вагових коефіцієнтів при вирішенні багатфакторного завдання. Відмічено, що така модель дозволяє перейти до обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій.

**Ключові слова:** підводне розмінування, надзвичайна ситуація, водолаз-сапер, багатфакторна модель.

**Постановка проблеми**

Незважаючи на те, що існуючий рівень технологічного прогресу дозволяє на протязі між 2010 та 2030 роками на 100% збільшити використання водних ресурсів, всі прибережні країни ЄС зіткнулись з викликами, що пов'язані із повоєнними залишками вибухонебезпечних [1, 2] та хімічних [3, 4] речовин у водних акваторіях. Крім цього у всьому світі на цей час встановлено біля 70 мільйонів мін, з яких, ймовірно, 15% встановлені на мілководні ділянки внутрішніх водоймищ [5]. В Україні ці виклики усугубляються як значною кількістю вибухонебезпечних предметів на узбережжі Чорного та Азовського морів, характерним прикладом чого є Херсонська область [6], так і збільшенням вибухонебезпечних предметів, які забруднюють мирні водні акваторії внаслідок агресії Росії.

З урахуванням того, що в нашій країні питання підвищення розвідки та розмінування водного середовища у порівнянні з ліквідацією вибухонебезпечних предметів на суходолі, де накопичено величезний досвід [7], потребують подальшої розробки [8], проблема підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій (НС), пов'язаних з підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Координацію зусиль та забезпечення єдиних підходів щодо підводного розмінування водних акваторій в Європі здійснює Балтійська рада з безпеки боєприпасів (BOSB) [9]. Проте в її документах, які спільно із США конкретизовані в Міжнародному стандарті IMAS 09.60 «Підводна розвідка та знешкодження вибухових речовин» [10] і де підкреслена особлива роль водолазів-саперів,

особливості забезпечення оперативної діяльності особового складу з урахуванням взаємодії достатньо специфічних факторів, які характеризують людину, середовище, а також технічні засоби, які вони використовують, не розглядаються. Як не розглядаються ці питання і в Стандартній оперативній процедурі гуманітарного підводного розмінування [11], де основна увага приділяється підготовці водолазів-саперів.

Питання передового досвіду, який використовується під час обстеження та знешкодження підводних вибухонебезпечних боєприпасів, наведені в [12], але там розглядаються конкретні випадки та надається їх аналіз. Це надає національним властям і організаціям з протимінної діяльності керівництво можливість краще зрозуміти проблеми і складності підводних обстежень і операцій з розмінування. Проте при цьому питання прогнозування результатів діяльності водолазів-саперів та подальшого управління відповідними надзвичайними ситуаціями остаються поза увагою.

В більшості наукових досліджень, де розглядаються питання управління надзвичайними ситуаціями, пов'язаними з вибухо- та хімічно небезпечними об'єктами, основна увага звертається на характеристику об'єкта та результати його обстеження [1, 13, 14], у тому разі підвищення оперативності інформування військ щодо мінної обстановки безпосередньо в районі бойових дій [15], оцінку ризику [16], а також потенційні проблеми, що пов'язані із здоров'ям та підготовкою особового складу піротехніків [17–19].

Сучасною європейською перспективою попередження НС, пов'язаних з підводним знаходженням вибухонебезпечних предметів, є застосування принципів «не підривати» [20] та перехід на реалізацію можливостей підводних

робіт [21]. Але і в першому, і в другому випадку без участі спеціально підготовлених водолазів-саперів [22] не обійтись, а організація їх діяльності вимагає урахування як можливостей особового складу, так і умов, в яких вони будуть виконувати поставлені завдання, а також тактико-технічних характеристик обладнання, яке стоїть на озброєнні у відповідних підрозділах. При цьому навіть використання автономних підводних апаратів, які базуються на сенсорних технологіях, застосуванні хімічних та біометричних датчиків, спирається на підводну оперативну діяльність особового складу, залученого до виявлення підводних боєприпасів [23], що також вимагає урахування фізіологічних характеристик підводників. Це ж відмічено і в [24], де показано, що гнучкість в плануванні та виконанні підводних робіт з предметами, що не вибухнули, забезпечується залученням професіоналів у проведенні підводних робіт із застосуванням відповідних спеціальних засобів, тактико-технічні характеристики яких відповідають можливостям водолазів та умовам, в яких буде здійснюватись процес підводного розмінування. При цьому основна увага [25] на цей час приділяється пошуку та вилученню вибухонебезпечних предметів водолазами.

В той же час, конкретні розробки, наприклад [26], де розглядається управління проектами потенційно небезпечних підводних об'єктів у складі технічних, технологічних, організаційних та економічних інформаційних платформ, або [27], де розглядаються три датчика, що використовуються для виявлення та ідентифікації різних типів морських мін: гідролокатор, градієнтометр і інфрачервона камера, обмежуються розв'язанням вузьких задач. Хоча під час обговорення проблем підводного розмінування [28] особлива увага звертається на їх комплексний характер. Ефекти взаємодії між показниками, які характеризують водолазів-саперів, умови бойової роботи та оснащення особового складу, були підтверджені і в результатах дослідження дій підводників під час пошуку вибухонебезпечних предметів [29], але вони не мали кількісної оцінки. Крім цього, питання їх підйому не розглядалися.

Дослідження щодо попередження та ліквідації НС на суходолі розглядали цей процес з різних сторін, але їх важко безпосередньо використати для вдосконалення робіт з підводного розмінування. Так, в [29, 30] їх вивчали з точки зору розвитку НС, в [31, 32] – з позицій організації робіт з ліквідації НС, в [33, 34] – з позицій загальної теорії профілактики. Проте у всіх цих випадках вони не розглядали процес ліквідації НС, що пов'язані із підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, (далі за текстом такі надзвичайні ситуації позначаються ПНС), із позицій забезпечення якості

функціонування системи «ПНС – спеціальні засоби підводного розмінування – водолаз-сапер». В той же час, у відповідності до методології імітаційного моделювання [35], обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності таких складних систем повинно спиратись на закономірності їх функціонування в цілому.

Таким чином, важливою та нерозв'язаною частиною проблеми є відсутність математичної моделі процесу ліквідації надзвичайної ситуації, що пов'язана із підводним розташуванням вибухонебезпечного предмету, у загальному вигляді.

## Мета статті

Виходячи з наведеного вище, метою роботи є розробка математичної моделі процесу ліквідації надзвичайної ситуації, що пов'язана із підводним розташуванням вибухонебезпечного предмету, як процесу функціонування системи «ПНС – спеціальні засоби підводного розмінування – водолаз-сапер», яка повинна стати основою для обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо підвищення ефективності підводного розмінування водолазами-саперами без зниження рівня їх безпеки.

Для вирішення поставленої мети слід вирішити наступні основні завдання:

- визначити початкові та граничні умови функціонування математичної моделі;
- описати процес підводного розмінування у вигляді багатofакторної моделі;
- представити варіанти використання сил і засобів підводного розмінування у вигляді однофакторних моделей;
- визначити порядок аналізу вагомих коефіцієнтів в отриманих моделях.

## Виклад основного матеріалу

Розробка математичної моделі процесу підводного розмінування включає наступні етапи.

Така система має ряд специфічних особливостей:

- до неї входять підсистеми «людина» (безпосередньо водолаз-сапер, а також керівник водолазних робіт, керівник водолазного спуску, страхуючий та забезпечуючий водолази, особа, відповідальна за медичне забезпечення водолазних робіт та спусків та ін.), «техніка» (засоби індивідуального захисту органів дихання, індивідуальне водолазне спорядження, щупи, трали, підводні металодетектори та інше спеціалізоване обладнання), «середовище» (акваторія із гідрологічними особливостями, вибухонебезпечний предмет із своїми специфічними характеристиками тощо). Кожна підсистема підпорядкована загальній системі та, відповідно,

підпорядкована загальному процесу підводного розмінування:

– вона має ієрархічну структуру зв'язків між загальним критерієм для всієї системи в цілому та частковими, локальними критеріями, які формуються для окремих підсистем (пора року впливає як на розвиток надзвичайної ситуації з підводним розташуванням вибухонебезпечного предмету, так і на час безпосередніх дій щодо підводного розмінування водолазом-сапером, а, відповідно, і на час ліквідації ПНС);

– існують внутрішні зв'язки (недостатній рівень підготовленості водолаза-сапера може зробити неможливим використання можливостей технічного оснащення, яке є в групі піротехнічних та спеціальних водолазних робіт);

– функціонування системи вимагає постійного коригування управляючих заходів як з боку керівника ліквідації ПНС, який визначає загальний варіант бойової роботи в залежності від того, яким чином характер ПНС співвідноситься із Класифікатором ПНС [36], так і з боку водолаза-сапера, який самостійно приймає рішення, оскільки під водою діє практично тільки у відповідності до своїх знань та навичок;

– в ній постійно міняються складові системи (водолазна та інша спеціальна техніка, оснащення водолазів-саперів та їх навички, середовище, в умовах якого вони працюють):

– підводне розмінування повинно здійснюватись без загроз до загибелі або травмування як водолазів-саперів, так і інших осіб, в першу чергу тих, що забезпечують їх оперативну діяльність, а також виходу із строю водолазної техніки та іншого технічного оснащення, що стоїть на озброєнні в підрозділі.

В цій системі в якості вихідних даних присутні виступають показники, що характеризують безпосередньо водолазів-саперів (множина  $X_{BC}$ ), спеціальні засоби підводного розмінування (множина  $X_{CЗПР}$ ), надзвичайну ситуацію та умови проведення підводного розмінування, тобто навколишнє середовище (множина  $X_C$ ).

Сукупність цих чинників складають умови функціонування шуканої моделі. Оскільки вихідні дані розглядаються на момент початку робіт з підводного розмінування, в кожній множині відсутні спільні перемінні. Це дозволяє прийняти наступне: множини  $X_{BC}$ ,  $X_{CЗПР}$  та  $X_C$  є такими, що складають надмножину системи в цілому  $X$ .

*Опис процесу підводного розмінування.* Виходячи з того, що надмножина  $X$  визначає умови функціонування системи, справедливо

$$X = X_{BC} \cup X_{CЗПР} \cup X_C. \quad (1)$$

В загальному випадку порядок проведення підводного розмінування визначається як у відповідності до нормативних вимог ДСНС України, так і відповідності до особистого досвіду водолазів-саперів. Проте в усіх випадках має місце упорядковані послідовність дій особового складу. Тобто,

$$D = \langle \{D_m\}; m = 1, \dots, n_m; \varphi_1 : A_m \times X \rightarrow D_m \rangle, \quad (2)$$

де  $D_m$  –  $m$ -й варіант проведення підводного розмінування;

$n_m$  – кількість можливих варіантів підводного розмінування в умовах функціонування системи  $X$ ;

$A_m$  – множина, яка упорядковує правила організації системи таким чином, щоб за вихідних умов функціонування системи  $X$  отримати  $m$ -й алгоритм підводного розмінування;

$\varphi_1$  – відображення  $L_m \times X$  в множину  $D$ .

В процесі функціонування системи під час виконання окремих складових (наприклад, таких типових операцій підводного розмінування як одягання водолазного спорядження, занурення, огляд вибухонебезпечного предмету, його транспортування тощо), які забезпечують проведення підводного розмінування для обраного варіанту  $D^*$ , на інтервалі  $T$  має місце множина ефектів

$$E^* = \langle \{E_k^*\}; k = 1, \dots, n_k; \varphi_2 : B_k \times D^* \times T \rightarrow E_k^* \rangle, \quad (3)$$

де  $E_k^*$  – ефект від виконання  $k$ -ої складової обраного варіанту проведення підводного розмінування;

$n_k$  – кількість складових для  $D^*$ ;

$B_k$  – множина, яка упорядковує зв'язки між елементами множини  $D^*$  та результатом виконання окремих складових процесу ліквідації ПНС;

$\varphi_2$  – відображення  $B_k \times D^* \times T$  у множину  $E^*$  (визначення ефектів).

Це відображення уявляє собою фактично процес визначення ефектів від реалізації визначених складових обраного варіанту проведення підводного розмінування. Для їх отримання можна використовувати функціональні залежності з відповідної бази даних

$$E_k^* = F_k^*(X, T), \quad (4)$$

або емпіричні дані, які уявляють собою результат реалізації  $B_k$  після проведення натурних досліджень. І якщо в першому випадку

функціональна залежність (4) є фактично закономірністю виконання водолазами-саперами k-ої складової обраного варіанту підводного розмінування, то в другому випадку  $B_k$  визначає порядок отримання емпіричних даних.

Визначена множина E, як і множини D, A, B, що її формують, характеризує окремі властивості системи X. Але за результатами здійснення конкретного процесу підводного розмінування необхідно оцінити ефективність системи X як результат її ефективності Y на визначеному інтервалі часу. Це дозволяє ефективність проведення конкретного варіанту підводного розмінування  $Y^*$  представити у вигляді упорядкованої множини

$$Y^* = \left\langle \left\{ Y_q^* \right\}, q = 1, \dots, n_q; Y_1 > Y_2 > \dots \right\rangle, \quad (5)$$

де  $Y_q^*$  – q-й показник ефективності обраного варіанту підводного розмінування;

$n_q$  – кількість показників ефективності;

$C_q^*$  – множина (наприклад, спорядження водолазів-саперів, у тому разі засоби індивідуального захисту органів дихання), яка встановлює зв'язок між вихідними даними X та результатами E виконання окремих складових обраного варіанту підводного розмінування;

$\varphi_3$  – відображення  $C_q^* \times X \times E^*$  у множину  $Y^*$  (наприклад, визначення показників ефективності за результатами проведення реальних випадків підводного розмінування).

Оскільки у виразі (5) враховуються як технічні ( $X_{СЗПР}$ ), так і оперативні ( $X_{ВС}, X_C, D$ ) складові функціонування системи X, можна стверджувати, що  $Y^*$  відображає оперативно-технічний характер підводного розмінування, а її можна розглядати як закономірність підводного розмінування

$$Y^* = F^*(X) \quad (6)$$

у відповідності до обраного варіанту, оскільки вона уявляє собою закономірність, що відображає функціонування системи, встановлюючи об'єктивний, повторюваний за визначених умовах зв'язок між показниками якості системи та притаманними їй ефектами.

*Варіанти використання сил і засобів підводного розмінування у вигляді однофакторних моделей.* Виходячи з цього, цілями оцінки процесу підводного розмінування, які спираються на натурні

та імітаційні експерименти, а також експертні оцінювання, є:

– встановлення причинно-наслідкових зв'язків між обраними факторами, які впливають на систему, та результатами її функціонування;

– розкриття закономірностей підводного розмінування в залежності від оперативних та технічних складових, які характеризують систему;

– уточнення на основі отриманих функціональних залежностей таких правил організації системи, за яких буде перевищено визначене значення показника ефективності.

Впорядкованість множини Y дозволяє перейти від (6) до багатофакторної поліноміальної моделі, розробка якої спирається на відповідний план імітаційного експерименту, при виборі якого необхідно враховувати вихідні показники, які характеризують множини  $X_{ВС}, X_{СЗПР}$  та  $X_C$ . Тобто, має місце безліч показників, які впливають на підсумковий результат функціонування системи, що розглядається. Але тут потрібно мати на увазі побажання експертів, які залучаються до аналізу закономірності проведення підводного розгортання, не розглядати одночасно більше трьох факторів. Це вони пояснюють тим, що вплив більшої кількості факторів, які впливають на систему оцінити складно, оскільки її стан постійно та достатньо швидко змінюється. З урахуванням цього та результатів аналізу особливостей проведення підводного розмінування [6], виділені такі значимі фактори, які характеризують процес підводного розмінування як системи:  $x_1$  – рівень підготовленості водолаза-сапера;  $x_2$  – рівень оснащення;  $x_3$  – умови, в яких працює особовий склад.

Аналіз відібраних факторів та результати експериментальних досліджень [37] показують, що рівень  $x_1$  підготовленості водолазів-саперів впливає на час підводного розмінування нелінійно. Так, підвищення рівня практичної виучки особового складу буде сильніше впливати на час підводного розмінування при переході від початкового рівня підготовленості ( $x_1=-1$ ) до фахового ( $x_1=0$ ), ніж від фахового до високофахового ( $x_1=+1$ ). Останній відповідає рівню водолазів-саперів, які мають 1 клас або є Майстрами своєї справи.

Аналогічно можна говорити і про три рівні умов, в яких проводиться підводне розмінування. Гарним ( $x_3=+1$ ) відповідають гарна видимість, відсутність течії та глибина до 3 метрів. Звичайним ( $x_3=0$ ) – обмежена видимість на відстані більше 3 м, незначна течія та глибина від 3 м до 6 м, а поганим ( $x_3=-1$ ) – обмежена видимість на відстані менше 3 м, значна течія та глибина більше 6 м. Стосовно рівня оснащення на сьогоднішній день можна говорити

про два рівні: використання сухого ( $x_2=-1$ ) та мокрого ( $x_2=+1$ ) гідрокостюмів.

При цьому очевидним є взаємозв'язок між всіма обраними факторами. Так, гірші умови проведення робіт з підводного розмінування будуть краще виконані фахівцями з більш високим рівнем підготовленості та за кращого рівня оснащеності (в мокрому гідрокостюмі).

Тобто, під час розробки багатфакторної поліноміальної моделі необхідно враховувати, що вихідні показники можуть мати нелінійний вплив на показники ефективності проведення підводного розмінування та взаємодіяти між собою. В цьому випадку нелінійний вплив факторів в поліноміальній моделі можна врахувати їх квадратичним уявленням, а ефекти взаємодії – відповідним коефіцієнтами при добутках факторів, що розглядаються.

З урахуванням вищевикладеного доцільним є вибір плану  $3 \times 2 \times 3$  для проведення багатфакторного експерименту. В цьому випадку поліноміальна модель підводного розмінування має вигляд

$$Y = a_0 + a_1 X_{BC} + a_2 X_{CЗПР} + a_3 X_3 + a_{11} X_{BC}^2 + a_{33} X_C^2 + a_{12} X_{BC} X_{CЗПР} + a_{13} X_{BC} X_3 + a_{23} X_{CЗПР} X_C, \quad (7)$$

де  $X_{BC}, X_{CЗПР}, X_C$  – обрані для дослідження фактори, які конкретизують початкові перемінні.

Оскільки порівняльна оцінка обраних для розгляду факторів повинна виконуватись в нормованих перемінних  $x_1, x_2, x_3$ , необхідно отримати тотожній (7) вираз

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_{3n}, \quad (8)$$

де, якщо вибрати, наприклад, у якості показника ефективності часу підйому вибухонебезпечного предмету ( $Y=t$ ),

$$y = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (9)$$

де  $t_{\max}$  – час підйому вибухонебезпечного предмету водолазом-підводником початкового рівня підготовленості ( $x_1=-1$ ) в поганих умовах ( $x_2=-1$ ) з використанням сухого гідрокостюму ( $x_3 = -1$ ), с;

$t_{\min}$  – час підйому вибухонебезпечного предмету водолазом-підводником високофахового рівня підготовленості ( $x_1=+1$ ) в гарних умовах ( $x_2=+1$ ) з використанням мокрого гідрокостюму ( $x_3 = +1$ ), с.

В цьому випадку обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності функціонування системи здійснюється за результатами ранжування факторів  $x_i$  за ступенем впливу на ефективність проведення підводного розмінування

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_{3n} \quad (10)$$

$$\Downarrow$$

$$\left( x_{i \in (1, 3)}^{(1)} \geq x_{j \in (1, 3; j \neq i)}^{(2)} \geq x_{\gamma \in (1, 3; \gamma \neq i \dots j)}^{(3)} \right)$$

шляхом аналізу відповідних однофакторних моделей, отриманих при стабілізації інших  $x_{j \neq i}$  факторів

$$y = f_i(x_i). \quad (11)$$

Іншими словами, розгляд підводного розмінування у вигляді функціонування умовної системи «водолаз-сапер – спеціальні засоби підводного розмінування – підводне розташування вибухонебезпечного предмету» дозволяє представити цю систему у вигляді сукупності однофакторних моделей.

Порядок аналізу вагомих коефіцієнтів в отриманих моделях. Визначення оперативно-технічних рекомендацій здійснюється шляхом аналізу відповідних однофакторних моделей  $y = f_i(x_i)$ , отриманих при стабілізації інших факторів.

При цьому необхідно враховувати, що однофакторні моделі (11) у відповідності до параметрів яких визначаються оперативно-технічні рекомендації, при різних умовах стабілізації можуть відрізнятися (табл. 1) на рівнях, що відповідають координатам екстремумів  $y_{i \min}$  та  $y_{i \max}$ , а також в центрі факторного простору  $y_0$ .

Відповідно можуть відрізнятися і пропозиції щодо ефективності проведення підводного розмінування, які будуть отримані для центра факторного та для його країв. Тобто, обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності підводного розмінування доцільно здійснювати за максимальними перепадами  $\Delta y$ .

Таблиця 1

Однофакторні моделі  $y = f_i(x_i)$  при різних умовах стабілізації

Фактор	В зоні максимуму	В центрі факторного простору	В зоні мінімуму
1	2	3	4
$x_1$	$y = (b_0 - b_2 - b_3) + (b_1 - b_{12} - b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$	$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$	$y = (b_0 + b_2 + b_3 + b_{22} + b_{33}) + (b_1 + b_{12} + b_{13}) \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2$
$x_2$	$y = (b_0 - b_1 - b_2 + b_{11}) + (b_3 - b_{12} - b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$	$y = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$	$y = (b_0 + b_1 + b_2 + b_{11}) + (b_3 + b_{12} + b_{23}) \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2$
$x_3$	$y = (b_0 - b_1 - b_3 + b_{11}) + (b_2 - b_{13} - b_{23}) \cdot x_3$	$y = b_0 + b_3 \cdot x_3$	$y = (b_0 + b_1 + b_3 + b_{11}) + (b_2 + b_{13} + b_{23}) \cdot x_3$

Для визначення того, які вихідні чинники з множини  $X$  вимагають першочергової уваги в центрі факторного простору  $(x_0^{(i)})$  та на його краях  $(x_{\min}^{(i)}; x_{\max}^{(i)})$  необхідно проранжувати у відповідності з вагою коефіцієнтів при відповідній змінній в (7)-(9) в центрі факторного простору

$$(x_0^{(1)} \geq x_0^{(2)} \geq x_0^{(3)}) = \text{rang} \left\{ \begin{matrix} |b_{y_0(x_1)}| \\ |b_{y_0(x_2)}| \\ |b_{y_0(x_3)}| \end{matrix} \right\} \quad (12)$$

та на його краях

$$\begin{aligned} (x_{\min,(\max)}^{(1)} \geq x_{\min,(\max)}^{(2)} \geq x_{\min,(\max)}^{(3)}) = \\ = \text{rang} \left\{ \begin{matrix} |b_{y_{\min,(\max)}(x_1)}| \\ |b_{y_{\min,(\max)}(x_2)}| \\ |b_{y_{\min,(\max)}(x_3)}| \end{matrix} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

Аналіз ваги коефіцієнтів в однофакторних моделях у відповідності до (11) та (12) дозволить провести ранжування обраних факторів та визначити, який з них є найбільш вагомим та навпаки у кожній зоні. Оскільки обґрунтування пропозицій в цьому випадку базується на (10), де враховано вплив (у тому разі нелінійний) не тільки безпосередньо кожного окремого показника  $x_i$ , але й ефекти взаємодії з іншими показниками  $x_j (j \neq i)$ , то вони (пропозиції) мають оперативнотехнічний характер і стають основою конкретних оперативнотехнічних рекомендацій, оскільки обрані фактори характеризують як технічну (фактор  $x_2$ ), так і оперативну складові: роботу особового складу

(людський фактор  $x_1$ ) відділення підводного розмінування в умовах впливу навколишнього середовища (фактор  $x_3$ ).

Математична модель підводного розмінування. Умови, при яких проведення підводного розмінування розглядалось у вигляді функціонування умовної системи «водолаз-сапер – спеціальні засоби підводного розмінування – підводне розташування вибухонебезпечного предмету», дозволили його представити у вигляді функціоналу (6)

$$Y^* = F^*(X)$$

де  $Y^*$  – сукупність показників ефективності;  $X$  – надмножина характеристик функціонування системи.

Цей функціонал (6) є можливим представити у вигляді трифакторної поліноміальної моделі (7)

$$\begin{aligned} Y = a_0 + a_1 X_{BC} + a_2 X_{2 \text{ СЗПР}} + a_3 X_3 + \\ + a_{11} X_{BC}^2 + a_{13} X_C^2 + \\ + a_{12} X_{BC} X_{\text{СЗПР}} + a_{13} X_{BC} X_3 + a_{23} X_{\text{СЗПР}} X_C \end{aligned}$$

що дозволяє її розглядати як сукупність однофакторних моделей (11)

$$y = f_i(x_i),$$

де  $y$  – нормований показник ефективності;  $x_i$  – нормована характеристика  $i$ -го фактора при незмінності (стабілізації) всіх інших факторів.

Ранжирування вагомих коефіцієнтів в однофакторних моделях здійснюється за допомогою виразів (12) та (13), записаних у вигляді

$$\left( \begin{matrix} x_{\min,0,(max)}^{(1)} \geq x_{\min,0,(max)}^{(2)} \geq x_{\min,0,(max)}^{(3)} \end{matrix} \right) = \text{rang} \left\{ \begin{matrix} b_{y_{\min,0,(max)}(x_1)} \\ b_{y_{\min,0,(max)}(x_2)} \\ b_{y_{\min,0,(max)}(x_3)} \end{matrix} \right\} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{matrix} Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3; \\ y = f_i(x_i); \end{matrix} \right. \quad (15)$$

$$\left( \begin{matrix} x_{\min,0,(max)}^{(1)} \geq x_{\min,0,(max)}^{(2)} \geq x_{\min,0,(max)}^{(3)} \end{matrix} \right) = \text{rang} \left\{ \begin{matrix} b_{y_{\min,0,(max)}(x_1)} \\ b_{y_{\min,0,(max)}(x_2)} \\ b_{y_{\min,0,(max)}(x_3)} \end{matrix} \right\}$$

### Висновки

Процес проведення підводного розмінування доцільно розглядати як функціонування складної ергатичної системи «водолаз-сапер – спеціальні засоби підводного розмінування – підводне розташування вибухонебезпечного предмету». Це дозволяє перейти до відповідної упорядкованої множини у вигляді багатофакторної моделі, розробка якої спирається на відповідний план імітаційного експерименту.

Наявність поліноміальної моделі дозволяє врахувати нелінійний вплив обраних факторів, а також їх зв'язок між собою, на ефективність проведення підводного розмінування.

Математична модель підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України уявляє собою систему трьох аналітичних залежностей. Перша уявляє собою функціонал, який описує процес підводного розмінування у вигляді трифакторної поліноміальної моделі. Друга дозволяє уявити цей функціонал як сукупність однофакторних моделей. Третя забезпечує визначення вагових коефіцієнтів при вирішенні багатофакторного завдання.

Подальшої розробки вимагають обґрунтування методики скорочення часу підводного розмінування на основі математичної моделі (15) та дослідження щодо підвищення ефективності попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з підводним розташуванням вибухонебезпечних предметів, шляхом використання новітніх спеціалізованих засобів.

### References

1. Frey, Torsten; Beldowski, Jacek; and Maser, Edmund (2020). Explosive Ordnance in the Baltic Sea: New Tools for

Об'єднуючи вирази (7), (10), та (13) в систему рівнянь отримаємо шукану математичну модель

Decision Makers. The Journal of Conventional Weapons Destruction: Vol. 23: Iss. 3, Article 11. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol23/iss3/11>

2. Beck, A.J., Gledhill, M., Schlosser, C., Stamer, B., Böttcher, C., Sternheim, J., Greinert, J. and Achterberg, E.P. (2018). Spread, Behavior, and Ecosystem Consequences of Conventional Munitions Compounds in Coastal Marine Waters. *Frontiers in Marine Science*, 5(141). DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00141>

3. Ong, Caroline, Chapman, Tamara, Zilinskas, Raymond, Brodsky, Benjamin and Newman, Joshua (2013). Chemical Weapons Munitions Dumped at Sea: An Interactive Map. James Martin Center for Nonproliferation Studies. URL: [http://cns.miis.edu/stories/090806\\_cw\\_dumping.htm](http://cns.miis.edu/stories/090806_cw_dumping.htm)

4. Long, Terrance P. (2013). An International Overview of Sea Dumped Chemical Weapons: The Way Forward. Conventional Weapons Convention Coalition. URL: <http://www.cwcoalition.org/wp-content/uploads/2010/12/longpaper.pdf>

5. Matika, Dario, Barić, Slavko (2016). Maritime environmental security. *Scientific Journal of Maritime Research*, 30, 19–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.31217/p.30.1.3>

6. Solovjov, I.I., Ctrilecz, V.M. (2020) Problemni py'tannya vy`konannya robit z pidvodnogo rozminuvannya. Energozberezhennya ta promy`slova bezpeka: vy`kly`ky` ta perspekty`vy`. Tretya mizhnarodna naukovo-prakty`chna konferenciya. Ky`yiv: KPI, NNNDI PBtaOP, 225–231. [in Ukrainian]

7. Nakaz DSNS Ukraini N 461. (2018). «Pro zatverdzhennya Standartnoyi operaty`vnoyi procedury` 09.10-12(1)/DSNS "Poryadok provedennya organamy` ta pidrozdilamy` cy`vil`nogo zaxy`stu ochy`shhennya (rozminuvannya) tery`torij, zabrudneny`x vy`buxonebezpechny`my` predmetamy`. Operaty`vne reaguvannya"».

8. Nakaz DSNS Ukraini N 68. (2020). «Pro realizaciyu osnovny`x zahodiv z proty`minnoyi diyal`nosti u 2020 roci ta provedennya special`ny`x vy`buxovy`x robit».

9. Möller, Gunnar. (2011). From a DC-3 to BOSB: The Road to a Breakthrough in Military Safety Measures Against the Risks of Historic, Explosive Ordnance. *Marine Technology Society Journal*, 45(6), 26–34(9). DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.6.1>
10. IMAS 09.60:2014, IDT. Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance (EO). URL: [https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org\\_fileadmin\\_MAS\\_documents\\_imas-international-standards\\_english\\_series-09\\_IMAS\\_09.60\\_Underwater\\_Survey\\_and\\_Clearance\\_of\\_Explosive\\_Ordnance\\_EO\\_.pdf](https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/www.mineactionstandards.org_fileadmin_MAS_documents_imas-international-standards_english_series-09_IMAS_09.60_Underwater_Survey_and_Clearance_of_Explosive_Ordnance_EO_.pdf)
11. Standard Operating Procedures for Humanitarian Underwater Demining in South Eastern Europe. URL: <https://old.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/document/s/references-publications/Humanitarian-Underwater-Demining-in-South-Eastern-Europe.pdf>
12. Humanitarian Demining, Geneva International Centre for, "A Guide to Survey and Clearance of Underwater Explosive Ordnance" (2016). Global CWD Repository. 1326. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-globalcwd/1326>
13. Maussang, F., Chanussot, J., Rombaut, M., Amate, M. (2009). From statistical detection to decision fusion: detection of underwater mines in high resolution SAS images. *Advances in Sonar Technology*, edited by Sergio Rui Silva, In-Tech, pp. 111–150, 978-3-902613-48-6. hal-02118475. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02118475/document>
14. Mareike Kampmeier, Eefke M. van der Lee, Uwe Wichert, Jens Greinert (2020). Exploration of the munition dumpsite Kolberger Heide in Kiel Bay, Germany: Example for a standardised hydroacoustic and optic monitoring approach. *Continental Shelf Research*. Volume 198, 15 July 2020, 104108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104108>
15. Kotsyuruba, V., Tsiubulya, S., Rybalko, V., (2019). Obosnovaniye primeneniya metoda vozdushnoy razvedki rayona intensivnoy primeneniya minnogo oruzhiya. *Sotsialnoye razvitiye i bezopasnost*, 9(1), 60–68.
16. Sayle, S., Windeyer, T., Charles, M., Conrod, S., Stephenson, M. (2009). Site Assessment and Risk Management Framework for Underwater Munitions. *Marine Technology Society Journal*, 43(4), 41–51(11). DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.43.4.10>
17. The British Army – Commando Engineer Diver. UK Ministry of Defence. URL: <https://www.army.mod.uk/who-we-are/corps-regiments-and-units/corps-of-royal-engineers/> (Accessed 17 April 2017)
18. Werman, M., Loy, I. (2013). Training to Become Cambodia's First Underwater Deminers. *The World* (Arts, Culture & Media). URL: <https://www.pri.org/stories/2013-03-07/training-become-cambodias-first-underwater-deminers>
19. Mijajlovic, V. (2013). The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*, 17(2), Article 13. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13>
20. Huet, C., Mastroddi, F. (2016). Autonomy for underwater robots – a European perspective. *Autonomous Robot*, 40, 1113–1118. URL: <https://doi.org/10.1007/s10514-016-9605-x>
21. Cooper, N., Cooke, S., Burgess, K. (2018). Risky Business: Dealing with Unexploded Ordnance (UXO) in the Marine Environment. *Conference Proceedings Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017*. DOI: <https://doi.org/10.1680/cmsb.63174.0157>
22. Mijajlovic, V. (2013). The Regional Center for Divers Training and Underwater Demining. *The Journal of ERW and Mine Action*, 17(2), Article 13. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol17/iss2/13>
23. Camilli, R., Bingham, B.S., Jakuba, M.V., Duryea, A.N., LeBouvier, R., Dock, M. (2009). AUV Sensors for Real-Time Detection, Localization, Characterization, and Monitoring of Underwater Munitions. *Marine Technology Society Journal*, 43(4), 76–84(9). DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.43.4.6>
24. Herbert, J. (2010). Risk Mitigation of Chemical Munitions in a Deep-Water Geohazard Assessment. *Marine Technology Society Journal*, 44(1), 86–96(11). DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.44.1.4>
25. Rancich, T. (2011). Search and Recovery of Munitions by Divers. *Marine Technology Society Journal*, 45(6), 75–79(5). DOI: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.45.6.9>
26. Hrytsaienko, M. (2017). Development of the information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(40)), 57–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129208>
27. Olga Lucia Lopera Tellez, Alexander Borghgraef and Eric Mersch (2017). The Special Case of Sea Mines. *Mine Action - The Research Experience of the Royal Military Academy of Belgium*, Charles Beumier, Damien Closson, Vinciane Lacroix, Nada Milisavljevic and Yann Yvinec, IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/66994>
28. International Symposium Mine Action 2019 8 th to 11th April 2019, Slano, Croatia. URL: <http://www.ctro.hr/wp-content/uploads/2019/04/Knjiga-za-web-4-mb.pdf>
29. Olasunkanmi Habeeb Okunola (2019). Spatial analysis of disaster statistics in selected cities of Nigeria. *International Journal of Emergency Management*, 15(4), 299–315. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEM.2019.104195>
30. Ralf Josef Johanna Beerens (2019). Does the means achieve an end? A document analysis providing an overview of emergency and crisis management evaluation practice in the Netherlands. *International Journal of Emergency Management*, 15(3), 221–254. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEM.2019.102310>
31. Kayvan Yousefi Mojir, Sofie Pilemalm (2016). Actor-centred emergency response systems: a framework for needs analysis and information systems development. *International Journal of Emergency Management*, 12(4), 435–456. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJEM.2016.079844>
32. Willem Treurniet, Kees Boersma, Peter Groenewegen (2019). Configuring emergency response networks. *International Journal of Emergency Management*, 15(4), 316–333. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJEM.2019.104200>
33. Gibson, T.D. and Scott, N. (2019). Views from the Frontline and Frontline methodology: critical reflection on theory and practice. *Disaster Prevention and Management*, 28(1), 6–19. DOI: <https://doi.org/10.1108/DPM-07-2018-0214>
34. Garnier, E. (2019). Lessons learned from the past for a better resilience to contemporary risks. *Disaster Prevention and Management*, 28(6), 786–803. DOI:



<https://doi.org/10.1108/DPM-09-2019-0303>

35. Strelec, V.M. (2001). Imitacionnyj analiz sistemy «chelovek-mashina» kak metod ehrgonomicheskoy ocenki funkcionirovaniya avarijnykh sluzhb. *Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Radioehlektronika i informatika»*, 3(16), 125–128.

36. Natsionalnyi klasyfikator Ukrainy. Klasyfikator nadzvychainykh sytuatsii Ukrainy DK 019:2010. Pryiniato ta nadano chynnosti Nakazom Derzhspozhyvstandartu Ukrainy 11.10.2010 № 457.

37. Soloviov, I., Stetsiuk, Y., Strelets, V. (2020). Regularities of air consumption during underwater demining of water areas. *Problems of Emergency Situations*, 32, 132–144. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4400181>

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., с. н. с. наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру В.М. Стрілець, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

**Автор:** СОЛОВІЙОВ Ігор Ігорович  
начальник відділення – водолазний фахівець  
відділення підводного розмінування групи  
піротехнічних робіт та спеціальних водолазних  
робіт Аварійно-рятувального загону спеціального  
призначення  
Головне управління ДСНС України у Херсонській  
області  
e-mail – [cross199110@gmail.com](mailto:cross199110@gmail.com)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0400-6704>

## MATHEMATICAL MODEL OF UNDERWATER DEMINING BY DIPPER DIVERS OF THE SESU

I. Soloviev

Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in Kherson Region, Ukraine

*It is shown that the problem of improving the effectiveness of prevention of emergencies related to the underwater location of explosive objects is relevant. An important and unresolved part of the problem is the lack of a mathematical model of the emergency response process associated with the underwater location of an explosive device in general. Based on this, the object of the study was the elimination of an emergency situation related to the underwater location of explosive objects, and the subject of the study – the process of operational activities of personnel of the underwater demining department of a group of special diving rescue team. The aim of the work is to develop a mathematical model of the emergency response process related to the underwater location of an explosive object as a process of functioning of the system "emergency – special means of underwater demining – diver-sapper", which should be the basis for substantiation of operational and technical recommendations. increasing the efficiency of underwater demining by diver sappers without reducing their level of safety.*

*It is shown that the mathematical model of underwater demining by a diver-sapper is a system of three analytical dependences. The first is a functional that describes the process of underwater demining in the form of a three-factor polynomial model. The second allows us to present this functionality as a set of one-factor models. The third provides the definition of weights in solving a multifactor problem. It is noted that such a model allows to proceed to the substantiation of operational and technical recommendations to the management of the group of special diving works.*

*The advantage of the new scientific result is the ability to obtain both quantitative estimates of the impact of the direct components of the system "diver-sapper – special means of underwater demining – underwater location of an explosive object" and their relationship. The disadvantage is the large number of experimental results that must be obtained to implement the selected plan.*

**Keywords:** *underwater demining, emergency, diver-sapper, multifactor model.*