

Багатофакторна модель підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами ДСНС України

Multifactorial model of underwater detonation of the explosive object by divers-sappers of the State Emergency Service of Ukraine

Віктор Стрілець * A

* **Corresponding author:** д.тех.н., професор, старший викладач кафедри, e-mail: vstrelec1956@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5992-1195

Максим Грицаєнко B

к.тех.н., Перший заступник Голови, e-mail: post@firedept.mk.ua, ORCID: 0000-0002-4436-9382

Ігор Соловійв C

Начальник відділення, e-mail: cross199110@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0400-6704

Геннадій Камишенцев D

доктор технічних наук, науковий співробітник наукового відділу, e-mail: genana1976@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5780-3539

Viktor Strelets * A

* **Corresponding author:** Dr. of Sciences, Professor, Senior lecturer of the Department, e-mail: vstrelec1956@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5992-1195

Maksym Hrytsaienko B

Candidate of Technical Sciences, First Deputy Head, e-mail: post@firedept.mk.ua, ORCID: 0000-0002-4436-9382

Ihor Soloviov C

The Head of the department, e-mail: cross199110@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0400-6704

Gennady Kamyshentsev D

Dr. of Sciences, Researcher of the Scientific Department, e-mail: genana1976@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5780-3539

^A Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

^B Державна служба України з надзвичайних ситуацій, м. Київ, Україна

^C Головне управління ДСНС України у Херсонській області, м. Херсон, Україна

^D Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, м. Київ, Україна

^A National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine

^B State Emergency Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^C Head Office of the State Emergency Service of Ukraine in the Kherson Region, Kherson, Ukraine

^D National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine

Received: March 25, 2023 | Revised: April 13, 2023 | Accepted: April 30, 2023

DOI: 10.33445/sds.2023.13.2.12

Мета роботи: побудова багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету (ВНП), яка повинна стати основою обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій.

Метод дослідження: застосовувались змішані методи дослідження для досягнення поставленої мети: якісний для вибору плану проведення багатофакторного експерименту; метод безпосередніх експертних оцінок для отримання та оцінки вихідних даних; кількісні для визначення параметрів моделі, перевірки достовірності та її аналізу. Перевірка достовірності під час реальних підводних підривів ВНП.

Результати дослідження: вперше отримано модель підриву ВНП у вигляді трифакторного квадратичного поліному, коефіцієнти якого встановлюють кількісний зв'язок між рівнем підготовленості особового складу, зовнішніми умовами та спорядженням рятувальників.

Теоретична цінність дослідження: набув подальшого розвитку метод обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій рятувальникам шляхом урахування особливостей, які є властивими процесу підводного підриву ВНП.

Практична цінність дослідження: під час організації робіт з підводного підриву ВНП основну увагу треба звертати на рівень підготовленості водолазів-саперів та умови проведення гуманітарного підводного розмінування. Також необхідно враховувати тип спорядження і ефекти взаємодії між рівнем підготовленості особового складу та умовами роботи.

Purpose: the construction of a multifactorial model of underwater detonation of an explosive object (EO), which should become the basis for the justification of operational and technical recommendations.

Method: mixed research methods were used to achieve the goal: qualitative for choosing a plan for conducting a multivariate experiment; the method of direct expert evaluations for obtaining and evaluating raw data; quantitative for determining the parameters of the model, checking its reliability and analyzing it. Verification of reliability during real underwater explosions of EO.

Findings: for the first time, a model of EO undermining was obtained in the form of a three-factor quadratic polynomial, the coefficients of which establish a quantitative relationship between the level of preparedness of personnel, external conditions and rescuers' equipment.

Theoretical implications: the method of substantiating operational and technical recommendations to rescuers by taking into account the features that are inherent in the process of underwater detonation of EO has gained further development.

Practical value of the research: during the organization of work on the underwater detonation of the EO, the main attention should be paid to the level of preparedness of divers-sappers and the conditions for conducting humanitarian underwater demining. It is also necessary to take into account the type of equipment and the effects of interaction between the level of training of personnel and working conditions.

Оригінальність: вперше визначено показники, які характеризують процес підводного підриву ВВП як функціонування ерготехнічної системи “водолаз-сапер – надзвичайна ситуація, пов’язана з підводним розташуванням ВВП, який вимагає підриву на місці знаходження – спорядження особового складу”. У відповідності до цих показників відбувається обґрунтування оперативних рекомендацій.

Майбутні дослідження: необхідність отримання нових вихідних даних для побудови нової моделі підводного підриву ВВП, у тому разі, коли водолази-сапери будуть працювати на глибині більше ніж 10 м або використовувати ребрізери. Під час подальших досліджень підвищену увагу потрібно звернути на розробку пропозицій щодо планування оперативної діяльності.

Тип статті: розрахунково-аналітичний.

Ключові слова: підводний підрив, вибухонебезпечний предмет, водолаз-сапер, модель.

Originality: for the first time, the indicators that characterize the process of underwater detonation of the GNP as the functioning of the ergotechnical system “diver-sapper – an emergency situation related to the underwater location of the EO, which requires detonation at the location – personnel equipment” have been determined. In accordance with these indicators, operational and technical recommendations are substantiated.

Future Research: the need to obtain new input data to build a new model of underwater blasting of EO, in the event that sapper divers will work at a depth of more than 10 m or use rebreathers. During further research, increased attention should be paid to the development of proposals for operational planning.

Paper type: calculation-analytical.

Key words: underwater detonation, explosive object, diver-sapper, model.

1. Вступ

Із 70 мільйонів мін він, які забруднюють водні акваторії в світі, 15% встановлені на мілководних ділянках внутрішніх та прибережних районів [1]. Великомасштабна агресія росії суттєво збільшила і до того дуже велику кількість вибухонебезпечних предметів в акваторіях Чорного та Азовського морів, руслах річок, у тому разі Дніпра [2]. При цьому практика гуманітарного підводного розмінування в Херсонській області та в Дніпровсько-Бузькому лимані показала [3], що найбільш складним варіантом оперативної роботи водолазів-саперів ДСНС України навіть до війни з росією був підводний підрив вибухонебезпечних предметів (ВВП) другої категорії [4], які дуже небезпечно вилучити для подальшого знешкодження в заздалегідь визначених місцях.

2. Теоретичні основи дослідження

Це питання остається актуальним і в провідних країнах світу. Так, не дивлячись на широке застосування розробленої в Університеті Джона Хопкінса програми вдосконаленої роботизованої системи знешкодження ВВП (AEODRS) [5], основу високої ефективності військових водолазів-саперів ВМС США складає докладно відпрацьована система їх підготовки, в якій особлива увага приділяється методам підводного знешкодження вибухових речовин [6, 7], у тому разі саморобних [6].

Міжнародний стандарт протимінної діяльності IMAS 09.60 “Підводне дослідження та знешкодження вибухонебезпечних предметів (Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance (EO))” встановив основні принципи та вимоги до підводних операцій щодо очищення вибухонебезпечних боєприпасів [4]. З урахуванням цього стандарту Женевський міжнародний центр гуманітарного розмінування GICHD (Centre international de déminage humanitaire – CIDHG) підготував Посібник з огляду та очищення підводних ВВП [8], інформація в якому розширює загальні відомості IMAS 09.60 [4] і стосується підводних вибухових боєприпасів у територіальних водах країни і внутрішніх водах до глибини 50 м або менше. Підхід, викладений у цьому стандарті, поєднав у собі військову тактику та методологію протимінної діяльності з використанням комерційних технологій але урахування особливостей, притаманних підводному підриву вибухонебезпечних речовин під час гуманітарного розмінування прибережних акваторій та русел річок, не було визначеним.

В [9] показано, що для визначення особливостей гуманітарного підводного розмінування доцільно використовувати результати аналізу відповідної математичної моделі, представленої у вигляді багатофакторного поліному. Тоді у відповідності до [10] розробка оперативних рекомендацій здійснюється, в першу чергу, з урахуванням вагових коефіцієнтів багатофакторної моделі. Стосовно конкретних умов діяльності спеціалізованого відділення підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних

робіт це наведено в [11], де представлена багатофакторна модель підйому ВВП водолазами-саперами у вигляді три факторного квадратичного поліному, коефіцієнти якого встановлюють кількісний зв'язок між рівнем підготовленості особового складу, зовнішніми умовами, в яких він працює, та спорядженням рятувальників, а також пропозиції по вдосконаленню саме цього виду оперативної діяльності. В той же час, аналіз, наведений [12], підтвердив, що характер діяльності водолазів-саперів під час підводного пошуку ВВП, їх підйому на поверхню, а також підриву, у разі такої необхідності, має суттєві відмінності. Відповідно, без отримання багатофакторної моделі не можна обґрунтувати оперативно-технічні рекомендації водолазу-саперу ДСНС України щодо підвищення ефективності підводного підриву ВВП без зниження рівня безпеки особового складу.

3. Постановка проблеми

З урахуванням цього невирішеною проблемою, яка заважає використанню існуючого науково-методичного апарату обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій особового складу рятувальних підрозділів, у тому разі того, який займається гуманітарним підводним розмінуванням, є відсутність математичної моделі підводного підриву ВВП водолазом-сапером ДСНС України.

Це вимагає її створення з урахуванням того, що на час підводного підриву, який розглядається у якості показника ефективності, впливають особливості, що є притаманними водолазам-саперам, котрі залучені до гуманітарного підводного розмінування, умов підводного середовища, в яких вони будуть здійснювати підрив ВВП, а також задіяного обладнання.

4. Методологія дослідження

Досягнення поставленої мети (побудови багатофакторної моделі підводного підриву ВВП водолазами-саперами під час гуманітарного розмінування водних акваторій) буде вирішуватись шляхом послідовного розв'язання наступних завдань:

- вибір плану для проведення багатофакторного експерименту;
- отримання та оцінка вихідних даних;
- визначення параметрів багатофакторної моделі підводного підриву ВВП водолазами-саперами;
- перевірка достовірності багатофакторної моделі підводного підриву вибухо-небезпечного предмету водолазами-саперами;
- аналіз багатофакторної моделі підводного підриву ВВП водолазами-саперами.

5. Результати

5. 1. Вибір плану для проведення багатофакторного експерименту

На підсумковий результат гуманітарного розмінування водних акваторій впливає безліч показників [9]. В той же час, оскільки до аналізу результатів підводного підриву будуть залучені експерти-фахівці з підводного розмінування, передбачається одночасний розгляд трьох факторів. Це викликано тим, що практика використання експертних оцінок для отримання вихідних даних [13, 14] показала, що одночасну дію більшої кількості факторів їм врахувати важко, оскільки стан системи постійно та достатньо швидко змінюється.

Оскільки процес підводного гуманітарного розмінування можна розглядати як функціонування системи «людина (водолаз-сапер) – техніка (його оснащення) – середовище (умови проведення підводного розмінування) [9], а також враховуючи результати експериментального визначення [12] особливостей того, як діють водолази-сапери, у якості

значимих факторів були обрані: x_1 – рівень підготовленості водолаза-сапера; x_2 – рівень оснащення; x_3 – умови, в яких працює особовий склад.

Їх аналіз з урахуванням [11, 12] показав, 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 ($x_2=+1$) відповідають гарна видимість, відсутність течії та глибина до 3 метрів. Звичайним ($x_2=0$) – обмежена видимість на відстані більше 3 м, незначна течія та глибина від 3 м до 6 м, а поганим ($x_2=-1$) – обмежена видимість на відстані менше 3 м, значна течія та глибина більше 6 м. Стосовно рівня оснащення в нашому випадку на сьогоднішній день можна говорити про два рівні: використання сухого ($x_3=-1$) та мокрого ($x_3=+1$) 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 оснащення (в мокрому гідрокостюмі).

Тобто, як і у випадки підйому ВВП з глибини [11] під час розробки багатофакторної поліноміальної моделі підводного підриву в процесі гуманітарного розмінування водних акваторій необхідно враховувати, що вихідні показники можуть мати нелінійний вплив на показники ефективності проведення підводного підриву 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.

Оскільки обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій доцільно [15] здійснювати за результати аналізу поліноміальних моделей в кодованих перемінних, то у відповідності до [9] необхідно створити трифакторну поліноміальну модель

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (1)$$

$$\text{де } y = \frac{t-t_{min}}{t_{min_{max}}} - \text{нормований вигляд часу } t \text{ підводного підриву}; \quad (2)$$

де t_{max} – час підйому ВВП 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 ВВП водолазом-підводником високофахового рівня підготовленості ($x_1=+1$) в гарних умовах ($x_2=+1$) з використанням мокрого гідрокостюму, с.

Виходячи з (1) для проведення багатофакторного експерименту доцільно вибрати план $3 \times 3 \times 2$ [9], оскільки в цьому випадку модель (1) буде мати [15] гарні статистичні та точні характеристики всіх коефіцієнтів регресії. В цьому випадку для реалізації обраного плану необхідно отримати 18 оцінок середнього часу підводного підриву вибухонебезпечного предмету, які відповідають заздалегідь визначеному співвідношенню обраних факторів x_1 , x_2 та x_3 , а також 18 значень відповідних середньоквадратичних відхилень.

Таким чином, для отримання багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазом-сапером в процесі гуманітарного розмінування

необхідно провести багатофакторний експеримент у відповідності до плану 3х3х2.

5. 2. Отримання та оцінка вихідних даних

Використання (4)-(17), наведених в [16] і в основі яких лежить застосування методу безпосередніх експертних оцінок, дозволило отримати (в табл. 1 наведено приклад отримання відповідних оцінок за результатами, які надали експерти для ситуації з найгіршим поєднанням факторів) вихідні дані у відповідності до обраного плану 3х3х2 (табл.2).

Таблиця 1 – Результати аналізу експертних оцінок для ситуації підриву вибухонебезпечного предмету на глибині у випадку найгіршого поєднання факторів

Показник	Експерт							
	1	2	3	4	5	6	7	8
t_{jmin}	18	17	21	17	17	18	18	17
t_{jmin}	1080	1020	1260	1020	1020	1080	1080	1020
$\tilde{t}_j, \text{хв.}$	21	20	24	19,5	20,5	21,5	20,5	19,5
$\tilde{t}_j, \text{с}$	1260	1200	1440	1170	1230	1290	1230	1170
t_{jmax}	25	26	28	25	24	26	25	24
t_{jmax}	1500	1560	1680	1500	1440	1560	1500	1440
\tilde{x}_i	0,429	0,333	0,429	0,313	0,500	0,438	0,357	0,357
v	2	2	2	1	2	2	2	2
W	$W \geq W_{дон}(\alpha = 0,05)$ - має місце не випадкова узгодженість експертів. Розподіл часу підйому вибухонебезпечного предмету за найгіршого поєднання факторів може розглядатись як нормальний, оскільки не має скошеного характеру [x]							
$\tilde{t}_{(-1,-1,-1)}, \text{с}$ (хв.)	1246,46 (20,77)							
$\tilde{\sigma}_{(-1,-1,-1)}, \text{с}$ (хв.)	73,125 (1,219)							

Джерело: розроблено авторами

Наявність результатів багатофакторного експерименту у відповідності до плану 3х3х2 (табл.2) дозволяє перейти до отримання трифакторної поліноміальної моделі (1) підриву ВВП водолазами-саперами, але для цього необхідно перейти до нормованого у відповідності до (2) подання вихідних даних (табл.3).

Таблиця 2 – Результати експертного оцінювання розглянутих у відповідності до плану 3х3х2 варіантів підводного підриву вибухонебезпечного предмету

Варіант підриву	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
x_2	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	0
x_3	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
$\tilde{t}, \text{с}$	1246,5	1203,6	1057,3	1011,0	939,6	889,6	1153,7	1103,7	939,6
$\tilde{\sigma}, \text{с}$	73,13	71,46	74,52	71,88	71,10	71,58	72,30	72,42	71,10
Варіант підйому	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x_1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
x_2	0	1	1	-1	-1	0	0	1	1
x_3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
$\tilde{t}, \text{с}$	896,8	811,1	761,2	1110,9	1060,9	889,6	839,7	736,2	689,8
$\tilde{\sigma}, \text{с}$	71,94	71,70	71,34	70,86	71,58	71,88	71,46	70,92	70,56

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Результати експертного оцінювання розглянутих у відповідності до плану 3х3х2 варіантів підводного підриву вибухонебезпечного предмету у нормованому вигляді

Варіант підриву	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
x_2	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	0
x_3	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
\tilde{x}	1,0000	0,9231	0,6603	0,5769	0,4487	0,3590	0,8333	0,7436	0,4487
$\sigma_{\tilde{x}}$	0,1314	0,1284	0,1339	0,1291	0,1277	0,1286	0,1299	0,1301	0,1277
Варіант підриву	10	11	12	13	14	15	16	17	18
x_1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
x_2	0	1	1	-1	-1	0	0	1	1
x_3	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
\tilde{y}	0,3718	0,2179	0,1282	0,7564	0,6667	0,3590	0,2692	0,0833	0,0000
$\sigma_{\tilde{y}}$	0,1292	0,1288	0,1282	0,1273	0,1286	0,1291	0,1284	0,1274	0,1268

Джерело: розроблено авторами

Таким чином, застосування методу безпосередніх експертних оцінок дозволило отримати статистично значимі показники часу підйому вибухонебезпечного предмету у відповідності до обраного плану 3х3х2.

5.3. Визначення параметрів багатofакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами

Упорядкування результатів багатofакторного експертного моделювання таким чином, що найгірші показники відповідають рівню “-1-1-1”, а найкращі – “+1+1+1”, дозволяє суттєво спростити побудову конкретних поліноміальних моделей, які необхідно знайти, оскільки в результаті цього під час розрахунку оцінок коефіцієнтів b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} можна використовувати [15] готові формули

$$b_0 = A_0(0Y) - \sum A_{0i}(ii0Y), \quad (3)$$

$$b_i = A_i(iY), \quad (4)$$

$$b_{ij} = A_{ij}(ijY), \quad (5)$$

$$b_{ii} = A_{ii}(iiY) - A_{0i}(0Y), \quad (6)$$

де $A_0, A_{0i}, A_i, A_{ij}, A_{ii}$ – постійні для розрахунку коефіцієнтів регресії при симетричних планах;

$0Y, iiY, iY, ijY$ – суми результатів експертних оцінок в табл.3.

Це дозволило за отриманими результатами (табл.3), використовуючи (3)-(6), розрахувати коефіцієнти трифакторної квадратичної моделі (1), які встановлюють кількісний зв'язок між часом підводного підриву ВВП (в нормованих перемінних) та обраними факторами

$$y_{\text{підрив}} = 0,412 - 0,153 \cdot x_1 - 0,307 \cdot x_2 - 0,043 \cdot x_3 + 0,046 \cdot x_1^2 + 0,065 \cdot x_2^2 - 0,033 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0005 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (7)$$

Таким чином, отримано багатофакторну модель підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами ДСНС України у вигляді трифакторного квадратичного поліному, коефіцієнти якого встановлюють кількісний зв'язок між рівнем підготовленості особового складу, зовнішніми умовами, в яких він працює, та спорядженням рятувальників.

5.4. Перевірка достовірності багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами

Перевірка достовірності багатофакторної моделі підводного підриву ВВП водолазами-саперами проводилась шляхом порівняння результатів, отриманих у відповідності до (7), з результатами реального підводного підриву ВВП особовим складом відділення підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт аварійно-рятувального загону спеціального призначення Головного управління ДСНС України у Херсонській області.

Для цього в червні-липні 2021 року було зафіксовано час підводного підриву ВВП (артилерійський снаряд 76 мм – 1 одиниця; артилерійський снаряд 45 мм – 3 одиниці) за наступних ситуацій:

1. Начальник відділення підводного розмінування ГПР та СВР АРЗ СП ГУ ДСНС України у Херсонській області, майор служби цивільного захисту Соловейов Ігор Ігорович, водолаз 1 класу I-II групи спеціалізації робіт, «Водолаз-підривник» 31.07.2021 року, гідрокостюм сухого типу Santi Enduro, Херсонський район, р. Дніпро в районі залізничного мосту, умови: глибина – 6 м, течія – 0,4 м/с, видимість – 0,2 м, температура води 22°, температура повітря – 33°, ґрунт – мул, сила вітру – 1 бал, хвилювання поверхні води – 2 бали. Час підводного знищення – 18 хв. 45 с. Така ситуація підводного знищення вибухонебезпечного предмету відповідає варіанту співвідношення факторів $\{x_1, x_2, x_3\} = \{+1, -1, -1\}$.

2. Старший водолаз-сапер відділення підводного розмінування ГПР та СВР АРЗ СП ГУ ДСНС України у Херсонській області, старший прапорщик служби цивільного захисту Погорелий Володимир Миколайович, водолаз 2 класу I-II групи спеціалізації робіт, 03.07.2021 року, гідрокостюм мокрого типу Aqua Lung Sharm Safaga, Херсонський район, р. Дніпро в районі залізничного мосту, умови: глибина – 7 м, течія – 0,1 м/с, видимість – 1 м, температура води 23°, температура повітря – 29°, ґрунт – мул, сила вітру – 1 бал, хвилювання поверхні води – 1 бал. Час підводного знищення – 18 хв. 15 с. Така ситуація підводного знищення вибухонебезпечного предмету відповідає варіанту співвідношення факторів $\{x_1, x_2, x_3\} = \{0, -1, +1\}$.

3. Старший водолаз-сапер відділення підводного розмінування ГПР та СВР АРЗ СП ГУ ДСНС України у Херсонській області, прапорщик служби цивільного захисту Ходаковський Олександр Геннадійович, водолаз 2 класу I-II групи спеціалізації робіт, 06.07.2021 року, гідрокостюм сухого типу Santi Enduro, Херсонський район, р. Дніпро в районі залізничного мосту, умови: глибина – 6 м, течія – 0,1 м/с, видимість – 0,7 м, температура води 24°, температура повітря – 33°, ґрунт – мул, сила вітру – 2 бали, хвилювання поверхні води – 1 бал. Час підводного знищення – 19 хв. 30 с. Така ситуація підйому вибухонебезпечного предмету відповідає варіанту співвідношення факторів $\{x_1, x_2, x_3\} = \{0, -1, -1\}$.

4. Фельдшер відділення підводного розмінування ГПР та СВР АРЗ СП ГУ ДСНС України у Херсонській області, прапорщик служби цивільного захисту Ковтуненко Олександр

Валентинович, водолаз 3 класу I-II групи спеціалізації робіт, 16.07.2021 року, гідрокостюм мокрому типу Cressi Divers, Херсонський район, р. Дніпро в районі залізничного мосту, умови: глибина – 4 м, течія – 0,1 м/с, видимість – 1 м, температура води 24°, температура повітря – 31°, ґрунт – мул, сила вітру – 1 бал, хвилювання поверхні води – 1 бал. Час підводного знищення – 20 хв. 15 с. Така ситуація підводного знищення вибухонебезпечного предмету відповідає варіанту співвідношення факторів $\{x_1, x_2, x_3\} = \{-1, -1, +1\}$.

Наявність натурних результатів дозволила перевірити укладання натурних результатів (часу підйому вибухонебезпечного предмету) в умовах, які відповідають конкретній комбінації обраних факторів, в довірчі інтервали, що розраховані з надійністю 0,95 за результатами моделювання у відповідності до (7) та зворотного переходу до оцінки часу підводного підриву у відповідності до (2) за тієї ж комбінації обраних факторів

$$t(x_1, x_2, x_3) = \bar{t} \pm 1.96 \cdot \frac{\sigma(x_1, x_2, x_3)}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

де $n=8$ – кількість експертів, за оцінками яких визначались середньозважені оцінки середнього часу та середньоквадратичного відхилення у відповідності до обраної комбінації значимих факторів під час підйому вибухонебезпечного предмету.

Порівняння отриманих результатів (табл.4) показує, час підйому вибухонебезпечного предмету особовим складом відділення підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт під час підводного розмінування (рядок 3 табл.4) укладається в довірчі інтервали (рядки 4 та 5 табл.4), які розраховані з надійністю 0,95.

Таким чином, результати натурних експериментів, які були отримані під час реального гуманітарного розмінування р. Дніпро, співпадають з результатами, що були визначені за допомогою трифакторної поліноміальної моделі (7) підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами ДСНС України, та укладаються в довірчі інтервали, які розраховані з надійністю 0,95, що підтверджує надійність розробленої математичної моделі підводного розмінування (підводного підриву вибухонебезпечного предмету) під час ліквідації відповідної надзвичайної ситуації.

Таблиця 4 – Порівняння натурних експериментів з розрахунковими результатами

	Ситуація	1	2	3	4
1	Співвідношення факторів $\{x_1, x_2, x_3\}$	+1,-1,-1	0,-1,+1	0,-1,+1	-1,-1,+1
2	$t_{\text{під}}, \text{ с (хв.)}$ (натурний результат)	1125 (18,75)	1095 (18,25)	1170 (19,50)	1215 (20,25)
3	$t_{\text{під max}}, \text{ с (хв.)}$ (розрахунковий)	1136 (18,93)	1129 (18,82)	1179 (19,65)	1229 (20,48)
4	$t_{\text{під min}}, \text{ с (хв.)}$ (розрахунковий)	1085 (18,10)	1078 (17,97)	1128 (18,80)	1178 (19,64)

Джерело: розроблено авторами

5.5. Аналіз багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами

Для визначення адекватності моделі (7) була перевірена гіпотеза щодо однорідності ряду дисперсій по σ -критерію Кохрена [17]

$$Kh = (\tilde{\sigma}_u^2)_{max} / \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_i^2 \frac{0.018}{0.299} \quad (9)$$

де $(\tilde{\sigma}_u^2)_{max}$ – максимальна дисперсія в ряду, що розглядається;
 $n=18$ – кількість точок обраного плану $3 \times 3 \times 2$.

Оскільки при рівні ризику $\alpha = 0,05$, числі ступенів свободи $f_1 = 18 - 1 = 17$ та $n = 18$ табличне значення $\sigma_{табл} = 0,122$, тобто $\sigma^2 < \sigma_{табл}^2$, отриманий результат (8) підтверджує адекватність моделі (7) і дозволяє під час подальшого аналізу користуватись середньої нормованою дисперсією отриманих експертних оцінок

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{18} \cdot \sum_{n=1}^{18} \sigma_n^2 \approx 0,017. \quad (10)$$

Так, для розрахунку значень дисперсій оцінок отриманих коефіцієнтів також можна використовувати готові [15] вирази

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_0\} = A_0 \cdot \sigma_{\bar{x}} = 0,5022 \cdot 0,129 = 0,065, \quad (11)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_i\} = A_i \cdot \sigma_{\bar{x}} = 0,3333 \cdot 0,165 = 0,043, \quad (12)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ij}\} = A_{ij} \cdot \sigma_{\bar{x}} = 0,2887 \cdot 0,165 = 0,037, \quad (13)$$

$$\sigma_{\bar{x}}\{b_{ii}\} = A_{ii} \cdot \sigma_{\bar{x}} = 0,4082 \cdot 0,165 = 0,053, \quad (14)$$

які застосовуються для обчислювання відповідних критичних значень

$$b_{кр} = t \cdot \tilde{\sigma}\{b\}, \quad (15)$$

де t береться по таблицям [17] при обраному рівні значимості α та числі ступенів свободи $f=n=18$.

В табл.5 показані розраховані за (15) критичні значення коефіцієнтів для моделі (7).

Таблиця 5 – Критичні значення коефіцієнтів моделі (7)

α	0,01	0,05	0,1	0,2
t	2,552	1,734	1,33	0,862
$b_{0кр}$	0,1652	0,1123	0,0861	0,0558
$b_{iкр}$	0,1097	0,0745	0,0572	0,0370
$b_{ijкр}$	0,0950	0,0645	0,0495	0,0321
$b_{iiкр}$	0,1343	0,0913	0,0700	0,0454

Джерело: розроблено авторами

Отримані значення (15) дозволяють при кожному рівні ризику α побудувати та проаналізувати графи зв'язку між факторами. На рис.1 показані такі графи при зростаючому ризику для моделі (7). Видно (рис.2), що вже при рівні значимості двостороннього ризику $\alpha=0,01$ можна говорити, що на час підводного підриву ВВП особовим складом ДСНС України

впливають тільки рівень підготовленості x_1 та умови проведення підводного розмінування x_2 . Ця ж ситуація остається і за рівня $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,1$

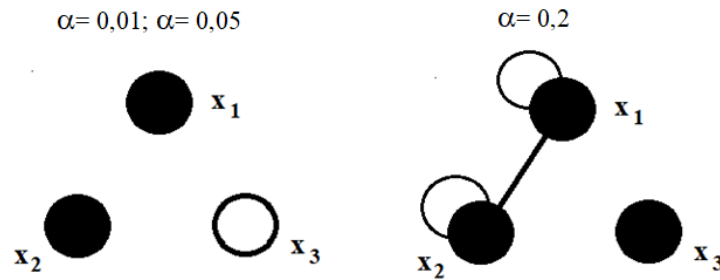


Рисунок 1 – Аналіз графів зв'язку між трьома факторами x_i за різного рівня відхилення правильної гіпотези (чорним кольором зафарбовані значущі лінійні ефекти, петля – значущий квадратичний ефект, ребра графа – значущими є ефекти взаємодії)

Джерело: розроблено авторами

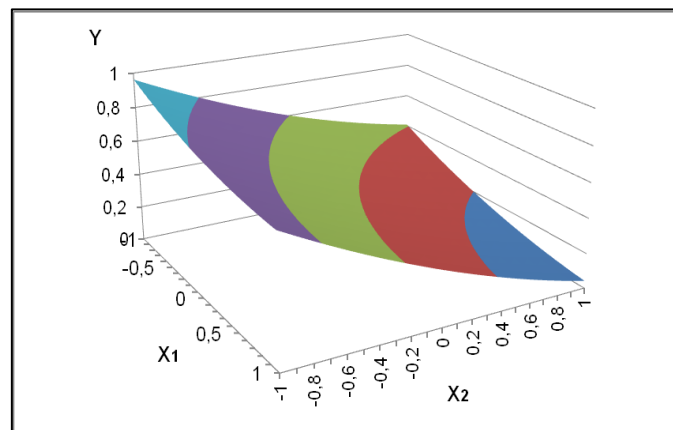


Рисунок 2 – Залежність (в кодированих перемінних) часу підводного підриву ВВП від рівня підготовленості водолазів-саперів та умов, в яких вони працюють

Джерело: розроблено авторами

В той же час, враховуючи те, що під час проведення пошукових досліджень, а дослідження систем «людина – техніка – середовище» відносяться саме до таких [15], можна давати висновки з рівнем значимості до 0,2, доцільно звернути увагу на те, що в практичній діяльності необхідно враховувати ефекти взаємодії між умовами здійснення підводного підриву ВВП та рівнем підготовленості водолазів-саперів, квадратичні (нелінійні) ефекти для цих значимих факторів (тобто підвищену увагу потрібно звернути на підготовку водолазів-саперів до роботи в складних умовах та на планування оперативної діяльності спеціалізованого піротехнічного підрозділу), а також те, що поява нових технічних засобів забезпечення гуманітарного підводного розмінування може суттєво вплинути на ефективність його проведення.

Таким чином, аналіз отриманої багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами відділення підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт показало з рівнем значимості двостороннього ризику $\alpha=0,05$, що під час розробки оперативно-технічних рекомендацій водолазам-саперам ДСНС України в першу чергу необхідно враховувати рівень підготовленості особового складу x_1 , умови проведення гуманітарного підводного розмінування.

6. Обговорення

Сильною стороною отриманих результатів є побудова багатофакторної моделі підриву ВВП водолазами-саперами у вигляді трифакторного квадратичного поліному, коефіцієнти якого не тільки характеризують рівень підготовленості особового складу, зовнішні умови, в яких він працює, та спорядження рятувальників, але й їх нелінійний вплив та ефекти взаємодії. Аналіз такої моделі при зростаючому рівні значимості коефіцієнтів від $\alpha=0,01$ до $\alpha=0,02$ дозволив визначити конкретні практичні рекомендації.

Слабкою стороною застосування обраного підходу є необхідність отримання нових вихідних даних у разі, наприклад, дозволу водолазів-саперів працювати на глибині більше ніж 10 м. Такі обмеження в побудові нової багатофакторної моделі викликані необхідністю отримання експертних оцінок висококваліфікованих фахівців підводного розмінування, що одночасно мають знання та навички як в практиці розмінування водних акваторій, так і в організації експериментальних досліджень. Крім цього суттєвим обмеженням розробленого підходу до отримання конкретної моделі є можливість його застосування тільки для апаратів на стисненому повітрі, коли вони використовуються на незначних глибинах.

В процесі розробки оперативно-технічних рекомендацій водолазам-саперам ДСНС України щодо підводного підриву ВВП необхідно враховувати всі обрані фактори (рівень підготовленості особового складу x_1 , умови проведення підводних робіт x_2 та тип водолазного костюму x_3), а також ефекти взаємодії між рівнем підготовленості особового складу та умовами, в яких вони працюють.

Під час проведення пошукових досліджень підвищену увагу потрібно звернути на підготовку водолазів-саперів до роботи в складних умовах та на планування оперативної діяльності спеціалізованого піротехнічного підрозділу, а також використання новітніх технічних засобів забезпечення підводного розмінування. Загрозою, яка може мати місце в процесі здійснення обраного підходу є те, що невірна експертна оцінка може призвести як до значного завищення очікуваною оцінки часу підводного підриву ВВП (у разі перестраховування), так і до людських жертв (у разі недостатньої уваги питанням безпеки). Тобто, під час обрання експертів потрібно звернути увагу на те, щоб всі вони були високо фаховими спеціалістами саме у підводному розмінуванні та мали досвід підводного підриву вибухонебезпечних предметів.

7. Висновки

Невирішеною проблемою, яка заважає використанню існуючого науково-методичного апарату обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій особового складу рятувальних підрозділів, у тому разі того, який займається гуманітарним підводним розмінуванням, є відсутність математичної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазом-сапером ДСНС України. Це вимагає її створення з урахуванням того, що на час підводного підриву, який розглядається у якості показника ефективності, впливають особливості, що є притаманними водолазам-саперам, котрі залучені до гуманітарного підводного розмінування, умов підводного середовища, в яких вони будуть здійснювати підрив вибухонебезпечного предмету, а також задіяного обладнання.

Для отримання багатофакторної моделі підриву вибухонебезпечного предмету водолазом-сапером ДСНС України на глибині доцільно провести багатофакторний експеримент у відповідності до плану $3 \times 3 \times 2$, вихідні дані для здійснення якого у вигляді статистично значимих показників здійснення цього виду гуманітарного підводного розмінування можуть бути отримані за результатами застосування методу безпосередніх експертних оцінок.

Отримано багатофакторну модель підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами у вигляді трифакторного квадратичного поліному, коефіцієнти якого встановлюють кількісний зв'язок між рівнем підготовленості особового складу, зовнішніми умовами, в яких він працює, та спорядженням рятувальників.

Результати натурних експериментів, які були отримані під час реального гуманітарного розмінування р. Дніпро, співпадають з результатами, що були визначені за допомогою трифакторної поліноміальної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами ДСНС України, та укладаються в довірчі інтервали, які розраховані з надійністю 0,95, що підтверджує надійність розробленої математичної моделі підводного розмінування (підводного підриву вибухонебезпечного предмету) під час ліквідації відповідної надзвичайної ситуації.

Аналіз отриманої багатофакторної моделі підводного підриву вибухонебезпечного предмету водолазами-саперами відділення підводного розмінування групи піротехнічних робіт та спеціальних водолазних робіт показало з рівнем значимості двостороннього ризику $\alpha=0,01$, що під час розробки оперативно-технічних рекомендацій водолазам-саперам ДСНС України в першу чергу необхідно звернути увагу на рівень підготовленості особового складу x_1 та умови проведення гуманітарного підводного розмінування x_2 . Поряд з цим також необхідно враховувати спорядження водолазів-саперів (фактор x_3), а також ефекти взаємодії між рівнем підготовленості особового складу та умовами, в яких вони працюють. Слід очікувати, що у випадку підводного підриву вибухонебезпечного предмету підвищення рівня підготовленості більш сильно буде проявлятися у водолазів-саперів з первинним рівнем, як і те, що саме для них на зниження ефективності підводного розмінування будуть сильніше впливати погані зовнішні умови роботи.

Під час проведення подальших досліджень підвищену увагу потрібно звернути на розробку пропозицій щодо підготовки водолазів-саперів ДСНС України до роботи в складних умовах та планування оперативної діяльності спеціалізованого піротехнічного підрозділу, а також використання новітніх технічних засобів забезпечення гуманітарного підводного розмінування.

8. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

9. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Matika D., Barić S. Maritime environmental security. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2016. № 30. P. 19-27.
2. Шкода докілью за півроку війни досягла майже 1 трильйона гривень // Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/news/39680.htm>
3. Соловйов І. І., Стрілець В. М. Проблемні питання виконання робіт з підводного розмінування. Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи. Третя міжнародна

References

1. Matika D., Barić S. Maritime environmental security. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2016. № 30. P. 19-27.
2. Shkoda dovkilliu za pivroku viiny dosiahla maizhe 1 tryliona hryven // Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (2022). Available from: <https://mepr.gov.ua/news/39680.html> [in Ukrainian]
3. Solovjov, I., Strilecz, V. (2020). Problematic issues of underwater demining. [Problemni py`tannya vy`konannya robit z pidvodnogo rozminuvannya]. Energy

- науково-практична конференція. Київ: КПІ, ННДІ ПБтаОП. 2020. С.225-231. URL : <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovsky%20A.Sapozhnikova%20N..pdf>
4. IMAS 09.60 Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance. URL : https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/user_upload/IMAS_09.60_Ed.1.pdf
 5. NAVY EXPLOSIVE ORDNANCE DISPOSAL PROGRAM. URL : <https://web.archive.org/web/20130219010652/http://eodmu-11.ahf.nmci.navy.mil/recruiter/EOD%20PRGM%20PACKET.htm>
 6. Navy EOD – Diver Training «Clearing the Way». URL : <http://www.stewsmith.com/linkpages/NavyEOD-Diver.htm>
 7. Center for Explosive Ordnance Disposal and Diving. URL : <https://www.netc.navy.mil/Commands/Center-for-Explosive-Ordnance-Disposal-and-Diving/Naval-School-Explosive-Ordnance-Disposal/Advanced-EOD-Training-Center/>
 8. 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>
 9. Соловійов І. Математична модель підводного розмінування водолазами-саперами ДСНС України. // *Комунальне господарство міст* – 2021. – 6(166). С. 175-183. URL : <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5887>
 10. Стрілець В.М. Розробка оперативнотехнічного методу скорочення часу проведення аварійно-рятувальних робіт першим пожежно-рятувальним підрозділом в умовах техногенних надзвичайних ситуацій. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. – Київ: ІГХНС НАНУ. – 2016. – 11. С. 26-36.
 11. Соловійов І. Багатофакторна модель підйому водолазом-сапером вибухонебезпечного предмету. / Соловійов І., Стрілець В., Льовін Д. // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. – 2021. – 2(34). conservation and industrial safety: challenges and prospects [Energozberezhennya ta promy`slova bezpeka: vy`kly`ky` ta perspekty`vy`]. Title Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference. Kyiv. Available from : <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovsky%20A.Sapozhnikova%20N..pdf> [in Ukrainian]
 4. IMAS 09.60 Underwater Survey and Clearance of Explosive Ordnance. Available from : https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/user_upload/IMAS_09.60_Ed.1.pdf
 5. NAVY EXPLOSIVE ORDNANCE DISPOSAL PROGRAM. Available from : <https://web.archive.org/web/20130219010652/http://eodmu-11.ahf.nmci.navy.mil/recruiter/EOD%20PRGM%20PACKET.htm>
 6. Navy EOD – Diver Training «Clearing the Way». Available from : <http://www.stewsmith.com/linkpages/NavyEOD-Diver.htm>
 7. Center for Explosive Ordnance Disposal and Diving. Available from : <https://www.netc.navy.mil/Commands/Center-for-Explosive-Ordnance-Disposal-and-Diving/Naval-School-Explosive-Ordnance-Disposal/Advanced-EOD-Training-Center/>
 8. Humanitarian Demining, Geneva International Centre for, “A Guide to Survey and Clearance of Underwater Explosive Ordnance” (2016). *Global CWD Repository*. 1326. Available from : <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-globalcwd/1326>
 9. Soloviev, I. (2021). Mathematical model of underwater demining by divers-sappers of the State Emergency Service of Ukraine [Matematychna model pidvodnoho rozminuvannia vodolazamy-saperamy DSNS Ukrainy]. *Municipal Economy of Cities*, 6(166), 175–183. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-175-183> [in Ukrainian]
 10. Strelets, V.M. (2016). Development of an operational and technical method of reducing the time of emergency and rescue operations by the first fire and rescue unit in man-made emergency situations. *Scientific and technical journal*

- C. 272-294.
<https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-20>
12. Соловійов І.І. Закономірності розходу повітря під час підводного розмінування водних акваторій. / І. І. Соловійов, Є. І. Стецюк, В. М. Стрілець // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2020. – № 2 (32). – С. 132-144.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4400181>
13. Стрілець В.М., Бородич П.Ю., Росоха С.В. Закономірності діяльності рятувальників при проведенні аварійно-рятувальних робіт на станціях метрополітену / за ред. В.М. Стрільця. Харків: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2012. 112 с.
14. Андронов В. А. Оперативно-технічний метод скорочення часу локалізації пожежно-рятувальним підрозділом надзвичайної ситуації екологічного характеру з викидом небезпечної хімічної речовини. / Андронов В.А., Стрілець В.М. // Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека». – Харків: НУЦЗУ, 2017. – Випуск 1. – С. 8-14.
15. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
16. Соловійов І. Методика обґрунтування оперативно-технічних рекомендацій щодо скорочення часу підводного розмінування водолазами-саперами Державної служби України з надзвичайних ситуацій. / Соловійов І., Стрілець В., Бляшенко О., Серватюк В., Пруський, А. // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. - 2022. – (2(14)). – С. 108-121.
[https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).108-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).108-121)
17. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. – Главная редакция физико-математической литературы издательства “Наука”, 1971. – 576 с.
- “Technological and ecological safety and civil protection”, 11, 26-36. [in Ukrainian]
11. Soloviov, I., Strelets, V. & Lovin, D. (2021). Multifactor model of excavation of an explosive subject diver. *Problems of emergency situations*, 2(34). 272-294. [in Ukrainian]
12. Soloviov I., Stetsiuk Y. & Strelets V. (2020). Regularities of air consumption during underwater demining of water areas [Zakonomirnosti rozkhodu povitria pid chas pidvodnoho rozminuvannia vodnykh akvatorii]. *Problems of Emergency Situations*, 2 (32), 132-144.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4400181> [in Ukrainian]
13. Strelets, V., Borodych, P. & Rosokha, S. (2012). Patterns of rescuers' activities during emergency rescue operations at subway stations. – *Kharkiv City Printing House*, 112 p. [in Ukrainian]
14. Andronov, V. & Strelec V. (2017). Operational and technical method of reducing the time of localization by the fire and rescue unit of an emergency situation of an environmental nature with the release of a dangerous chemical substance. *Technogenic and ecological safety*, 1, 8–14. [in Ukrainian]
15. Voznesenskij V. (1981). Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tehniko-ekonomicheskikh issledovaniyah [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies]. – *Finansy i statistika* [in Russian]
16. Soloviov, I., Strelets, V., Blyashenko, O., Servatyuk V. & Prusky A. (2022). Methodology for substantiating operational and technical recommendations on reducing the time of underwater demining by divers-sappers of the state emergency service of Ukraine. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, (2(14)). 108–121.
Civil Security
[https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).108-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).108-121). [in Ukrainian]
17. Mitropolskij A. (1971). Tehnika statisticheskikh vychislenij [Statistical Computing Technique]. – Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury izdatelstva “Nauka”. [in Russian]