

Методика розрахунку наслідків при проривах (руйнування) гідротехнічних споруд критичної інфраструктури

Methodology for calculating the consequences of breakthroughs (destruction) of hydraulic structures of critical infrastructure

Володимир Коцюруба ^A

Corresponding author: доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України, e-mail: kotcuru@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6565-9576

Volodymir Kotsyuruba ^A

Corresponding author: Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine kotcuru@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6565-9576

Ігор Процин ^B

ад'юнкт, e-mail: pros4in@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6686-5603

Ihor Proshchyn ^B

PhD student, e-mail: pros4in@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6686-5603

^A Командування Сил підтримки Збройних Сил України, Київ, Україна

^A Command of the Support Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

^B Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

^B National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: December 2, 2024 | **Revised:** December 09, December 2024 | **Accepted:** December 31, 2024

DOI: 10.33445/sds.2024.14.6.13

Мета роботи: удосконалити методику прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах терористичного характеру.

Метод дослідження: методи аналізу та синтезу.

Теоретична цінність дослідження: Запропонована методика має суттєве значення для теорії цивільного захисту та може бути використана не лише для проведення розрахунків при прогнозуванні масштабів та обсягів негативного впливу наслідків зруйнування гідротехнічних споруд, а і для проведення наступних наукових досліджень..

Практична цінність дослідження: дана методика дає можливість враховувати міграційні процеси населення та темпи розбудови урбанізованої місцевості при прогнозуванні параметрів надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах.

Цінність дослідження: розроблена методика враховує зниження прохідності місцевості, неоднорідність щільності забудови урбанізованої місцевості та густини заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень.

Тип статті: практичний.

Purpose: to improve the method of forecasting the consequences of emergency situations at hydrotechnical structures of a terrorist nature.

Method: analysis and synthesis methods

Theoretical implications: dangerous factors that arise as a result of the destruction (damage) of hydraulic units and can cause losses and affect the performance of a combat mission have been identified.

Practical implications: The proposed technique is of significant importance for the theory of civil protection and can be used not only for calculations when forecasting the scale and volume of the negative impact of the consequences of the destruction of hydrotechnical structures, but also for conducting further scientific research.

Value: the developed method takes into account the decrease in the patency of the area, the heterogeneity of the density of the built-up area in the urbanized area and the population density of the emergency situations within the flood zones.

Papertype: practical.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, техногенна катастрофа, природна катастрофа, техногенна небезпека, гідротехнічна споруда, гідродинамічна аварія, об'єкти критичної інфраструктури, застосування сил оборони.

Key words: emergency, man-made disaster, natural disaster, man-made danger, hydrotechnical structure, hydrodynamic accident, critical infrastructure objects, use of defense forces.

Вступ

У статті наведено удосконалену методику прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на гідротехнічних спорудах, яка на відміну від раніше запропонованих методик, додатково враховує зниження прохідності місцевості поза шляхами при перезволоженні ґрунтів різної категорії, неоднорідність щільності забудови урбанізованої місцевості та густини заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень при зруйнуванні гідротехнічних споруд, що дозволяє визначити умови руху транспорту поза шляхами, вплив наслідків надзвичайної ситуації на цивільну інфраструктуру та цивільне населення та, як наслідок, – підвищити точність прогнозованих оцінок.

Запропонована методика дозволить проводити практичні розрахунки при прогнозуванні масштабів та обсягів негативного впливу наслідків зруйнування гідротехнічних споруд. Проведені розрахунки із використанням удосконаленої методики дозволяють здійснити верифікацію та підтвердити адекватність розглянутого науково-методичного апарату.

Теоретичні основи дослідження

Під час проведення дослідження застосовано гідродинамічну імітаційну модель COASTOX, що заснована на розв'язанні системи рівнянь мілкої води Сен-Венана на неструктурованих трикутних сітках, метод прогнозування умов руху, статистичні методи для оцінювання масштабу та характеру зруйнувань. Зазначений методологічний підхід дає змогу розширити межі прогнозованих оцінок із одночасним аналізом впливу наслідків надзвичайної ситуації як на цивільне населення, критичну інфраструктуру, так і на результативність застосування озброєння та військової техніки в районах активних та пасивних затоплень місцевості.

У дослідженні використано праці сучасних українських науковців, присвячені прогнозуванню наслідків надзвичайних ситуацій на гідроспорудах, зокрема, Д. Стефанишина [2], Ю. Убайдулаєва та В. Бурбашина [3]. Взято до уваги методику розрахунку наслідків надзвичайних ситуацій, що базується на прикладі повного зруйнування ГТС [4]. Також використано дослідження щодо удосконалення методики оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій [5]. При цьому, у переважній більшості праць за даною тематикою не враховано важливий фактор – обмеження маневрених можливостей військ при перезволоженні ґрунтів, недостатньо уваги приділяється врахуванню неоднорідності щільності забудови населених пунктів та густота населеності районів виникнення надзвичайних ситуацій. Врахування вказаних факторів започатковано у попередніх авторських публікаціях [6-8].

Методологія дослідження

Протягом всього часу повномасштабної збройної агресії ворог систематично застосовує зброю проти цивільного населення, руйнує критичну інфраструктуру із застосуванням ЗПН [1]. Зокрема, збройні сили російської федерації неодноразово вдавалися до цілеспрямованого ураження ГТС. Таким чином, прогнозування наслідків руйнування ГТС не лише унаслідок техногенних катастроф та природних катастроф, а і внаслідок терористичних атак, в даний час є вкрай актуальним.

Існуючі методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах терористичного характеру не враховують зниження прохідності місцевості поза шляхами при перезволоженні ґрунтів різної категорії та обмеження маневрених можливостей військ у зазначених умовах, а також не приділяють належної уваги неоднорідності забудови урбанізованої місцевості та густині заселеності зони затоплення техніки за спеціально розробленими програмами.

Результати

Гідродинамічна аварія – це аварія на гідротехнічній споруді (ГТС), коли вода поширюється з великою швидкістю, що в свою чергу створює загрозу виникнення надзвичайної ситуації техногенного характеру. Такими аваріями в Україні можуть стати прориви гребель (дамб, шлюзів) з утворенням хвиль прориву та катастрофічних затоплень або з утворенням проривного паводку, і аварійні спрацьовування водосховищ гідроелектростанцій (ГЕС) у зв'язку із загрозою проривів ГТС. Характерним для катастрофічного затоплення у разі руйнування ГТС є велика швидкість поширення (3...25 км/год), висота (10...20 м) та ударна сила 5...10 т/м² хвилі прориву і велика швидкість затоплення значної за площею території.

В даний час найбільшу загрозу становить не стільки потенційна техногенна небезпека наявних в Україні ГТС, скільки можливі цілеспрямовані руйнування таких об'єктів ворожими засобами ураження.

Методика прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС терористичного характеру (далі – Методика) призначена для визначення числових значень прогнозованих показників впливу наслідків активних та пасивних затоплень на маневрені можливості військ, руйнування інфраструктури та втрати серед цивільного населення в районах виникнення надзвичайних ситуацій.

До сукупності прогнозованих показників оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС терористичного характеру входять:

умови руху по прохідності місцевості поза шляхами руху;

площа затопленої території місцевості;

кількість зруйнованих та пошкоджених об'єктів, що попали до зони затоплення;

кількість постраждалих, загиблих та поранених осіб під час пасивних та активних затоплень.

Як припущення дослідження приймаються середньостатистичні числові значення даних щодо заселеності районів у межах населених пунктів. Методика не враховує міграційні процеси суспільства, які притаманні сучасним умовам в Україні.

Структурно-логічна схема удосконаленої Методики наведена на рисунку 1.

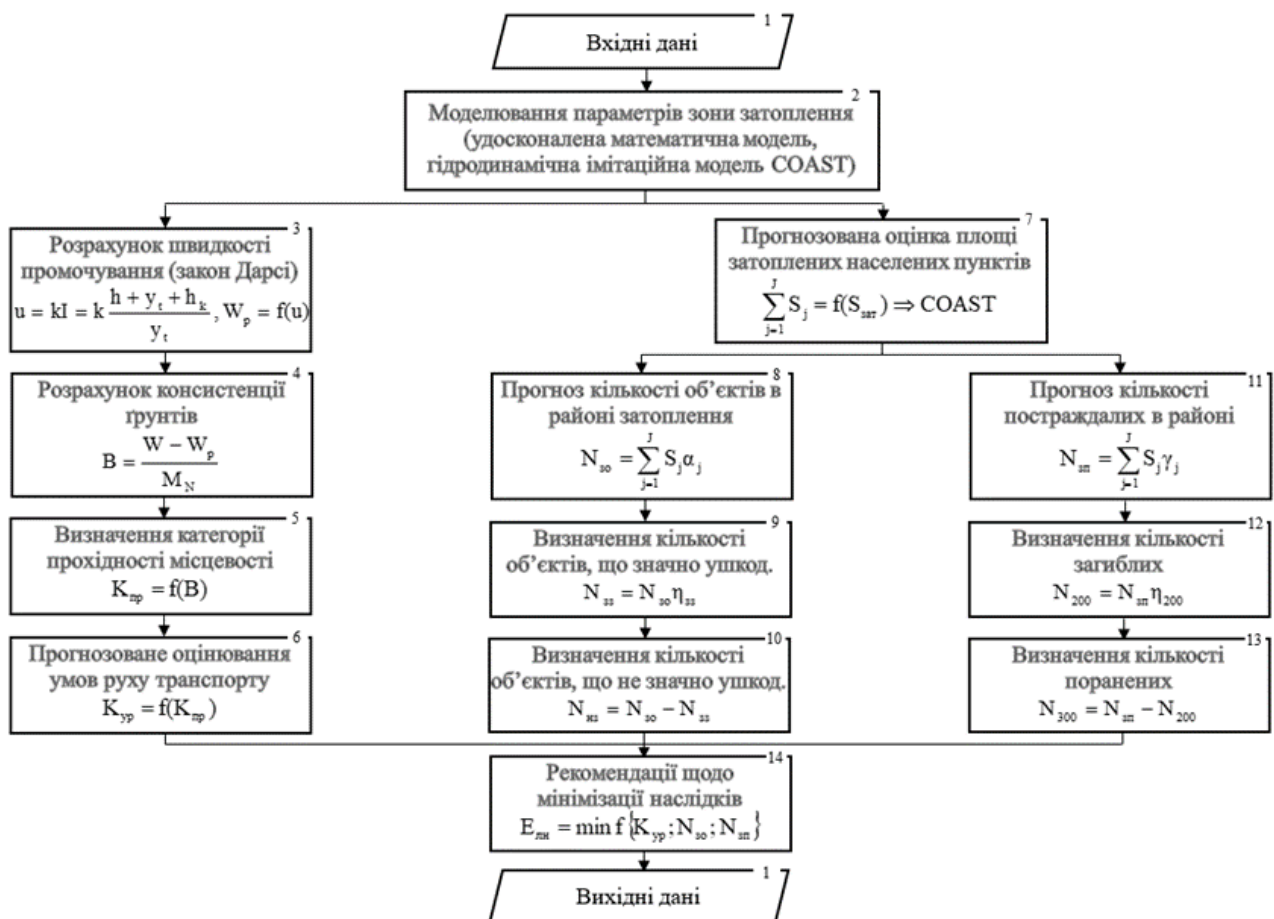


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема удосконаленої методики прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС терористичного характеру

Вхідними даними (блок 1) для проведення розрахунків є:
параметри водосховища, ГТС;

технічні характеристики засобів ураження противника, що застосовуються по ГТС; фізико-географічні та погодні умови (характеристики водної перешкоди та прилеглої території місцевості);

тип озброєння та військової техніки, що застосовується у районі;

щільність забудови прилеглих до водної перешкоди урбанізованих районів;

густина заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень.

У блоці 2 проводять моделювання процесів зруйнування ГТС засобами ураження противника та визначення параметрів зон затоплень із використанням удосконаленої математичної моделі [7,8]. Порівняльне оцінювання достовірності отриманих результатів моделювання [7] підтверджено високим збігом із результатами, отриманими із застосуванням гідродинамічної імітаційної моделі COASTOX, що є сертифікованим програмним продуктом.

Модель COASTOX – двовимірна гідравлічна модель, розроблена Інститутом проблем математичних машин і систем Національної академії наук України [9, 10]. Принцип роботи моделі заснований на розв'язанні системи рівнянь Сен-Венана (рівнянь мілкої води) на неструктурованих трикутних сітках. Модель дозволяє моделювати динаміку потоку води в просторі та часі, зокрема у випадку прориву гідротехнічних та гідрозахисних споруд. Модель є аналогом моделі HEC-RAS 2D [11], яка використовується корпусом інженерів США зокрема для моделювання проривів ГТС.

Раніше модель COASTOX використовувалась для розрахунку зон затоплення у випадку аномальних скидів через греблю Київської ГЕС [12], а також для розрахунку динаміки водного переносу радіонуклідів, що потрапили у водне середовище внаслідок аварій на Чорнобильській атомній електростанції [13] та атомній електростанції Фукусіма Дайічі [14].

У блоках 3-6 визначають числові значення прогнозованих показників впливу наслідків активних та пасивних затоплень на маневрені можливості військ, що ключовою різницею з попередніми доступними публікаціями у предметній галузі та складає перший елемент наукової новизни удосконаленої Методики.

Розрахунок швидкості промочування ґрунту здійснюють у блоці 3 із використанням закону Дарсі [3]. Із використанням результатів розрахунку визначають вологість ґрунту на границі розкочування, що відповідає переходу ґрунту з пластичного стану у твердий W_p .

У блоці 4 розраховують показник консистенції ґрунтів:

$$B = \frac{W - W_p}{M_N}, \quad (1)$$

де W – природна вагова вологість ґрунту, %;

W_p – вологість ґрунту на границі розкочування, що відповідає переходу ґрунту з пластичного стану у твердий, %;

M_N – число пластичності ґрунту, що є основною класифікаційною ознакою ґрунтів.

При $B > 1$ ґрунти знаходяться в текучому стані, а при $B < 0$ – у твердому. Проміжні значення показника консистенції $1 \geq B \geq 0$ характеризують ступінь пластичності ґрунтів [6].

На основі визначеного показника встановлюють категорію прохідності $K_{пр}$ (блок 5) відповідно до [6].

У блоці 6 здійснюють прогнозоване оцінювання умов руху транспорту $K_{ур}$ [6], які використовують під час планування застосування сил оборони із урахуванням їх маневрених можливостей.

Прогнозування характеру та обсягів зруйнувань та постраждалого цивільного населення у районах виникнення надзвичайних ситуацій, що пов'язано із зруйнуванням ГТС, здійснюють у блоках 7-13. Під час отримання результатів прогнозованих оцінок додатково враховують щільність забудови, прилеглих до водної перешкоди урбанізованих районів, та густину заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень, що складає другий елемент наукової новизни удосконаленої Методики.

Зокрема, із використанням моделі COASTOX у блоці 7 визначають сумарну площу населених пунктів, що потрапляють до зони затоплення:

$$\sum_{j=1}^J S_j = f(S_{\text{зат}}), \quad (2)$$

де $f(S_{\text{зат}})$ – функція належності до загальної площі затоплення місцевості.

Кількість об'єктів (будівель), що прогнозовано можуть отримати пошкодження різного ступеня визначають у блоці 8 за формулою:

$$N_{\text{зо}} = \sum_{j=1}^J S_j \alpha_j, \quad (3)$$

де α_j – щільність забудови урбанізованої місцевості в межах районів виникнення надзвичайних ситуацій.

Ступінь терористичного впливу по відношенню до ушкодження будівель відповідно [4,5] класифікують за трьома основними вражаючими факторами, які в більшому або меншому ступені проявляються при скоєнні терористичних актів з переважним застосуванням ЗПН противника. Перший вражаючий фактор – це кінетичний удар ЗПН. Другий – це пожежа, що виникає внаслідок горіння палива ЗПН. Третій – це фугасна дія та дія ударної хвилі, яка виникає під час вибуху палива, або вибухівки, завантаженої ЗПН.

В урбанізованій місцевості для споруд та інших об'єктів розрізняють чотири ступеня руйнування: повне, сильне, середнє та слабке [5]. У Методиці прийнято, що повне та сильне руйнування споруд віднесено до значних пошкоджень об'єктів інфраструктури. Середнє та слабке – до не значних.

Отже, прогнозовану кількість значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (блок 9) визначають як:

$$N_{\text{зз}} = N_{\text{зо}} \eta_{\text{зз}}, \quad (4)$$

де $\eta_{\text{зз}}$ – показник відносних середньостатистичних оцінок значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (за досвідом зруйнування ГТС приймають рівним 0,15...0,2).

Значення прогнозованої кількості не значно пошкоджених об'єктів інфраструктури (блок 10) визначають за формулою:

$$N_{\text{нз}} = N_{\text{зо}} - N_{\text{зз}}. \quad (5)$$

У блоці 11 здійснюють прогноз загальної кількості постраждалих у районі виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної із зруйнуванням ГТС:

$$N_{\text{зп}} = \sum_{j=1}^J S_j \gamma_j, \quad (6)$$

де γ_j – густина заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень.

Кількість загиблих серед цивільного населення визначають у блоці 12 за формулою:

$$N_{\text{200}} = N_{\text{зп}} \eta_{\text{200}}, \quad (7)$$

де η_{200} – показник відносних середньостатистичних оцінок загиблих (за досвідом зруйнування ГТС приймають рівним 0,05...0,1).

Прогнозовану оцінку кількості поранених (блок 13) здійснюють як:

$$N_{300} = N_{зп} - N_{200} \quad (8)$$

У блоці 14 розробляють рекомендації щодо мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на ГТС із використанням оптимізаційного критерію:

$$E_{лн} = \min f \{K_{yp}; N_{30}; N_{зп}\}. \quad (9)$$

Блок 15 – узагальнення вихідних даних на основі прогнозованих оцінок наслідків надзвичайних ситуацій при зруйнуванні ГТС.

Наведемо приклад використання методики.

Розглянемо Дніпровський каскад ГЕС, який складається з 6 ГЕС. Найбільша з них – Дніпровська ГЕС потужністю 1500 МВт. Загальна площа водосховищ – 6950 км². Повний об'єм акумульованої води – 43,9 км³. Можливі варіанти застосування противником ЗПН для ураження Дніпровської ГЕС (знімок з висоти 4340 м над рівнем моря) наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Найбільш імовірні варіанти атаки ГТС із використанням ЗПН противника

Моделювання наслідків руйнування Дніпровської ГЕС із використанням моделі COASTOX. В якості вихідного сценарію руйнування було використано історичний випадок 18 серпня 1941 року, коли червона армія вчинила умисний підрив греблі для зниження темпів просування військ Німеччини. Орієнтовна потужність вибуху становила 20 т. На основі історичних даних проран греблі було оцінено як 200 м в ширину, 60 м (повна висота греблі) у висоту. Зони затоплення розраховувались для гідрогеологічних умов станом на квітень 2024 року: рівень на нижньому б'єфі ГЕС – 15,7 м; рівень на верхньому б'єфі ГЕС – 51,5 м; витрата води – 3000 м³/с. Результати моделювання зони затоплення в цілому та в районі м. Запорозжя наведено на рисунку 3.



Рисунок 3 – Загальні прогнозовані зони затоплення для умовного сценарію прориву ГТС: блакитним – початкові умови моделювання, синім – зони затоплення в наслідок прориву

Параметри зони затоплень за результатами моделювання із використанням гідродинамічної моделі COASTOX наступні. Довжина (ширина) зони затоплення – 240 (3...24) км. Висота хвилі прориву – 5...23 м. Тривалість затоплення – 53 год.

На основі отриманих даних щодо максимальної площі затоплення в наслідок прориву греблі Дніпровської ГЕС було проведено аналіз масштабів затоплення із використанням геопросторових технологій. Для оцінки використовувались наступні геопросторові шари: шар адміністративних границь населених пунктів та розташування будівель на місцевості (сервіс OpenStreetMap); шар оціночної щільності населення в Україні станом на 2023 (дані з відкритого доступу LandScan Global Population Database). Слід зазначити, що використані шари знаходяться у відкритому доступі. Точність шарів стає вищою для густо урбанізованої місцевості.

На основі даних шарів було розраховано площі затоплення, орієнтовну кількість постраждалого населення для найбільш затоплених населених пунктів (таблиця 1).

Таких населених пунктів виявилось 6. Враховуючи різницю густини заселеності сумарна очікувана кількість постраждалих у районі виникнення надзвичайної ситуації (рисунок 3) складе більш ніж 32000 осіб. З них мінімально очікувана кількість загиблих – близько 1600.

Таблиця 1 – Прогнозовані площі затоплення, кількості постраждалого населення у зонах затоплення для основних населених пунктів

Назва населеного пункту	Площа затоплення, км ²	Прогнозована кількість постраждалого населення
Запоріжжя	25,51	27400
Кардашинка	28,62	930
Херсон	2,30	2820
Білогрудове	1,54	240
Олешки	1,34	310
Гола Пристань	1,26	650

Для прикладу було проведено детальний аналіз затопленої інфраструктури та угідь поблизу м. Запоріжжя (рисунок 4).



Рисунок 4 – Прогнозування затоплення місцевості поблизу м. Запоріжжя

Результати моделювання показали, що в зону затоплення потрапляє (рисунок 4) близько 1340 будівель. Відповідно прогнозованих оцінок з них отримають ушкоджень: значних – 268; незначних – 1072 будівлі цивільної інфраструктури. Аналогічні розрахунки можуть бути проведені для решти населених пунктів в межах зон затоплень.

Аналіз ґрунтових умов в районі м. Запоріжжя показав, що там переважають чорноземи, число пластичності яких відповідно [3] приймаємо рівним $MN=15$. Результати розрахунків показали, що показник консистенції ґрунтів в середньому дорівнює $B=0,82$. За даними [3, 7] стан ґрунтів оцінено як текучопластичні. При цьому, для колісної техніки категорія прохідності – V, для гусеничної техніки – III. Отже, прогнозоване оцінювання умов руху транспорту (Кур) дозволило зробити висновок про незадовільні умови застосування колісної техніки та ускладнені характеристики прохідності заболоченої місцевості після повного просочування води у ґрунт для гусеничної, що дозволить здійснювати поодинокий рух лише гусеничної техніки зі швидкостями 10...15 км/год.

Отримані результати моделювання із використанням математичної моделі [7] збігаються із результатами, що отримані за допомогою гідродинамічної імітаційної моделі COASTOX. Похибка на окремих ділянках зон затоплення не перевищує 5%, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів розрахунків та адекватність удосконаленої Методики.

Висновки

Таким чином, удосконалена Методика, на відміну від існуючих, додатково враховує зниження прохідності місцевості поза шляхами при перезволоженні ґрунтів різної категорії, неоднорідність щільності забудови урбанізованої місцевості та густини заселеності районів виникнення надзвичайних ситуацій в межах зон затоплень при зруйнуванні ГТС. Методика ґрунтується на моделюванні параметрів зон затоплень при руйнуванні ГТС різного характеру та ступеню їх пошкоджень внаслідок терористичних атак противника із використанням гідродинамічної моделі COASTOX, що дозволяє визначити умови руху транспорту поза шляхами, вплив наслідків надзвичайної ситуації на цивільну інфраструктуру і цивільне населення та підвищити точність прогнозованих оцінок.

Запропонована методика має суттєве значення для теорії та практики галузі

цивільного захисту та може бути використана як для проведення наукових досліджень, так і для проведення практичних розрахунків при прогнозуванні масштабів та обсягів негативного впливу наслідків зруйнування ГТС.

Проведені розрахунки із використанням удосконаленої Методики дозволили здійснити верифікацію та підтвердити адекватність розглянутого науково-методичного апарату. В цілому, виникає потреба щодо продовження досліджень проблемних питань прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах. Як напрям подальших досліджень є розроблення практичних рекомендацій щодо мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на ГТС України, особливостей застосуванні військ (сил) в умовах затоплення, ефективності управління військами в умовах надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Урядовий портал Денис Шмигаль закликав міжнародних партнерів тиснути на росію, аби вона відновила гідротехнічні споруди Каховської ГЕС. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/>.
2. Стефанишин. Д. В. Досвід і перспективи імовірнісного аналізу надійності й безпеки гідротехнічних споруд ГЕС і ГАЕС. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер.: Технічні науки. 2013. Вип. 2(62). С. 108–122.
3. Локалізація та ліквідація надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах: навч. посіб. / О.Й. Мацько, Ю.Н. Убайдулаєв, В.В. Барбашин, І.О. Толкунов. Х.: НУЦЗУ, 2012. 112 с.
4. Мурасов, Р., & Тертишний, Б. (2022). Методика розрахунку наслідків при проривах (руйнування) гідротехнічних споруд критичної інфраструктури. *Social Development and Security*, 12(6), 140-152. <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.6.12>
5. Мурасов Р., Нікітін А., Мещеряков І., Підгородецький М., Поплавець С. Методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2023. № 3(48). С. 35–43.
6. Процин, І. (2023). Аналіз факторів та фізико-географічних умов що впливають на причини виникнення аварій на гідротехнічних спорудах. *Social Development and Security*, 13(3), 196-205. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.13>
7. Процин І.В, Коцюруба В.І., Михайловський Д.В. Моделювання затоплення місцевості в наслідок зруйнування гідротехнічних споруд. 2023. Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. К.: КНУБА. Вип. 111. С. 87–101.
8. Процин І.В, Коцюруба В.І. Удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд: Науковий журнал *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. Том 49. №1. С. 69–77.
9. Zheleznyak M., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M. Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems // Behavior of Radionuclides in the Environment III. Springer, Singapore. 2022, P. 199–252.

10. Сорокін, М. В. Розпаралелювання чисельних розв'язків рівнянь мілкої води методом скінченних об'ємів для реалізації на багатопроцесорних системах графічних процесорах // Екологічна безпека та природокористування, 2023. № 46(2). С. 163–193.
11. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS 2D Modeling User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., April 2021.
12. Бойко В.М., Євдін Є.О., Железняк М.Й., Коломієць П.С., Іщук О.О. Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зон затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідравлічної моделі // Гідрологія, Гідрохімія, Гідроекологія. 2012. № 1(26). С. 55–63.
13. Zheleznyak M. J., Demchenko R. I., Khursin S. L., Kuzmenko Y. I., Tklich P. V, Vitiuk N.Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of The Total Environment*. 1992. № 112(1) P. 89–114.
14. Zheleznyak M., Dykyi P., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M., Aoyama M., Tsumune D.. Modelling of Cs-137 transport in the nearshore zone of Fukushima-Daiichi NPP under the combined action of waves, currents and fluxes of sediments // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2018/4.

References

1. The government portal Denys Shmyhal called on international partners to put pressure on Russia to restore the hydraulic facilities of the Kakhovskaya HPP. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/>.
2. Stefanyshyn D. V. (2023). Experience and prospects of probabilistic reliability and safety analysis of hydrotechnical structures of hydroelectric power plants and gas power plants. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management*. 2013. Issue 2(62). P. 108–122.
3. Localization and liquidation of emergency situations at hydrotechnical structures: training manual / O.Y. Matsko, Y.N. Ubaidulaev, V.V. Barbashyn, I.O. Tolkunov. Kharkiv: NUTZU, 2012. 112 p.
4. Murasov, R., & Tertyshnyy, B. (2022). Method of calculating the consequences of breaking (destruction) of hydrotechnical structures of critical infrastructure. *Social Development and Security*, 12(6), 140-152. <https://doi.org/10.33445/sds.2022.12.6.12>
5. Murasov R., Nikitin A., Meshcheryakov I., Pidhorodetskyi M., Poplavets S. Methodology for assessing threats and risks for critical infrastructure objects according to scenarios of the development of emergency situations. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defense*. 2023. No. 3(48). P. 35–43.
6. Proshchyn, I. (2023). Analysis of factors and physical and geographical conditions that influence the causes of accidents at hydrotechnical structures. *Social Development and Security*, 13(3), 196-205. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.13>
7. Proshchyn I. V., V.I. Kotsyuruba, D. V. Mykhaylovskiy. Modeling of flooding of the area as a result of the destruction of hydraulic structures. 2023. *Resistance of materials and theory of structures: science and technology collection*. Kyiv: KNUBA. Vol. 111. P. 87-101.
8. Proshchyn I. V., Kotsyuruba V. I. An improved method of determining the parameters of the movement of the breakthrough wave and flooding during the destruction of hydrotechnical structures: *Scientific journal Modern information technologies in the field of security and defense*. 2024. Volume 49. No. 1. P. 69–77.
9. Zheleznyak M., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M. Modeling of Behavior of Fukushima-Derived Radionuclides in Freshwater Systems. *Behavior of Radionuclides in the Environment III*. Springer, Singapore. 2022, R. 199–252.

10. Sorokin, M.V. Parallelization of numerical solutions of shallow water equations using the finite volume method for implementation on multiprocessor systems graphics processors. *Ecological safety and environmental management*, 2023. No. 46(2). P. 163–193.
11. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS 2D Modeling User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis CA., April 2021.
12. Boyko V.M., Yevdin E.O., Zheleznyak M.Y., Kolomiets P.S., Ishchuk O.O. (2012). Peculiarities of the formation of the spring flow of the Dnipro and modeling of flooding zones within the city of Kyiv based on a modern hydrologic-hydraulic model. *Hydrology, Hydrochemistry, Hydroecology*. No. 1(26). P. 55–63.
13. Zheleznyak M.J., Demchenko R.I., Khursin S.L., Kuzmenko Y.I., Tkalich P.V, Vitiuk N.Y. (1992). Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripjat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*. 1992. No. 112(1) P. 89–114.
14. Zheleznyak M., Dykyi R., Kivva S., Pylypenko O., Sorokin M., Aoyama M., Tsumune D. Modeling of Cs-137 transport in the nearshore zone of Fukushima-Daiichi NPP under the combined action of waves, currents and fluxes of sediments // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2018/4.