

Прогнозування параметрів затоплення необхідних для планування заходів захисту населення та територій

Forecasting Flood Parameters Required for Planning Measures to Protect the Population and Territories

Юрій Стародуб

доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та хімії горіння, e-mail: George_Starodub@yahoo.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1947-7197>

Андрій Гаврись

Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри цивільного захисту, e-mail: Havrys.AND@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-7906>

Олександра Пекарська

викладач кафедри цивільного захисту, e-mail: oleksa.pekarska@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6945-2588>

Вікторія Філіппова

ад'юнк, e-mail: filippova99@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0771-1975>

Yuriy Starodub

DSc, Professor, Professor in the Department of Physics and Chemistry of Combustion, e-mail: George_Starodub@yahoo.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1947-7197>

Andrii Havrys

Corresponding author: PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Civil Protection, e-mail: Havrys.AND@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2527-7906>

Oleksandra Pekarska

Lecturer of the Department of Civil Protection, e-mail: oleksa.pekarska@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6945-2588>

Viktoriia Filippova

PhD student, e-mail: filippova99@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0771-1975>

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Received: July 17, 2026 | Revised: August 20, 2026 | Accepted: August 31, 2026

УДК 680.3+556.5

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.4.30>

Мета роботи. Обґрунтувати математичні моделі та алгоритми прогнозування ключових параметрів затоплення, що виникають унаслідок природних та техногенних чинників, для формування розрахунково-аналітичної бази, необхідної для якісного планування заходів інженерного та цивільного захисту.

Методи дослідження. Дослідження базується на поетапному підході, що передбачає аналіз геоморфологічних характеристик русел річок, комплексне застосування методів математичного та гідродинамічного моделювання просторово-часових параметрів водного потоку. Використано аналітичний метод для оцінювання руйнівної дії гідропотоку на об'єкти інфраструктури та життєзабезпечення з урахуванням захисного ефекту наявних інженерних споруд.

Результати дослідження. Систематизовано комплекс математичних алгоритмів для розрахунку параметрів затоплення, зокрема глибини, швидкості, висоти та часу добігання хвилі прориву. Визначено аналітичні залежності, які дають змогу просторово та в часі прогнозувати динаміку водного потоку. Запропонований розрахунково-аналітичний апарат долає фрагментарність в оцінці руйнівної дії водної маси, поєднуючи визначення гідравлічних параметрів та оцінку ступеня руйнування об'єктів у єдиний прогностичний цикл. Доведено, що врахування часового фактора та наявності захисних конструкцій критично впливає на достовірність визначення початкового руйнівного впливу хвилі на будівлі та комунікації.

Практична цінність дослідження. Отримані розрахункові метрики руйнівної дії гідропотоку, з огляду на його кінетичну енергію та тривалість стояння води, дають змогу органам місцевого самоврядування та підрозділам цивільного захисту завчасно визначати безпечні зони. Запропонована методологія оптимізує алгоритми евакуації населення та мінімізує деструктивний вплив на критичну інфраструктуру під час складання планів попередження і

Purpose. To develop mathematical models and algorithms for forecasting key flood parameters resulting from natural and man-made factors, in order to establish the computational and analytical framework necessary for effective planning of engineering and civil protection measures.

Method. The study is based on a phased approach that involves analyzing the geomorphological characteristics of river channels and the comprehensive application of mathematical and hydrodynamic modeling methods for spatio-temporal parameters of water flow. An analytical method was used to assess the destructive impact of water flow on infrastructure and life-support facilities, taking into account the protective effect of existing engineering structures.

Findings. A set of mathematical algorithms for calculating flood parameters—specifically, the depth, velocity, height, and arrival time of a breaching wave—has been systematized. Analytical relationships have been determined that enable the prediction of water flow dynamics in both space and time. The proposed computational and analytical framework overcomes the fragmented nature of assessing the destructive impact of a water mass by combining the determination of hydraulic parameters and the assessment of the degree of damage to structures into a single predictive cycle. It has been proven that considering the time factor and the presence of protective structures critically affects the accuracy of determining the initial destructive impact of a wave on buildings and infrastructure.

Practical implications. The calculated metrics of the destructive impact of a flood, taking into account its kinetic energy and the duration of water accumulation, enable local government authorities and civil protection agencies to identify safe zones in advance. The proposed methodology optimizes population evacuation algorithms and minimizes the destructive impact on critical infrastructure during the development of prevention and response plans, ensuring a transition from reactive response to proactive risk prevention.

реагування, забезпечуючи перехід від ситуативного реагування до проактивного запобігання ризикам.

Paper type. Theoretical.

Тип статті. Теоретична.

Ключові слова цивільний захист; затоплення; територіальні громади; критична інфраструктура; гідротехнічні споруди; математична модель; планування заходів цивільного захисту.

Key words. Civil Protection; Flooding; Local Communities; Critical Infrastructure; Hydraulic Structures; Mathematical Model; Civil Protection Planning.

Вступ

Стійка тенденція до зростання частоти та масштабів гідрологічних надзвичайних ситуацій вимагає концептуального переходу національної системи цивільного захисту від реактивного ліквідування наслідків до проактивного управління ризиками. У цьому контексті завчасне та високоточне прогнозування параметрів зон затоплення з використанням засобів просторового аналізу є фундаментальною основою для підтримки прийняття ефективних управлінських рішень. Отримані розрахункові моделі формують науково обґрунтований базис для розроблення спеціалізованих планів попередження на рівні територіальних громад, просторового проектування інженерних споруд та оптимізації алгоритмів евакуації (Гаврись, 2025). У масштабах усієї країни імплементація такої прогностичної методології є запорукою підвищення інституційної стійкості територій, безпеки життєдіяльності населення та гарантування сталого функціонування об'єктів критичної інфраструктури, що набуває виняткової ваги в процесах комплексного повоєнного відновлення.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні математичних моделей та алгоритмів прогнозування ключових параметрів затоплення (глибини, швидкості потоку, висоти та часу добігання хвилі прориву), що виникають в наслідок природніх та техногенних чинників, для формування розрахунково-аналітичної бази, необхідної для якісного планування заходів інженерного та цивільного захисту. Удосконалена математична модель враховує вже існуючі на території споруди інженерного захисту та їхній захисний ефект впливу на розрахункову висоту затоплення. Реалізація зазначеного підходу спрямована на підвищення обґрунтованості та ефективності розроблення планів попередження та реагування на затоплення, що дозволить оптимізувати алгоритми евакуації населення, мінімізувати деструктивний вплив гідропотоку на інфраструктуру та забезпечити стійкість територій до гідрологічних і техногенних загроз.

Об'єктом дослідження є процес виникнення та поширення затоплень, що виникли в наслідок природніх та техногенних чинників та їхній вплив на безпеку населення й інфраструктури.

Предметом дослідження є математичні моделі та алгоритми прогнозування параметрів затоплення з урахуванням захисного ефекту наявних інженерних споруд для розроблення планів попередження та реагування.

Незважаючи на існуючі підходи до оцінки гідрологічних загроз, актуальним залишається завдання прогнозування просторово-часової динаміки затоплень із врахуванням захисного ефекту наявних інженерних захисних споруд. Відповідно, виникає гостра необхідність удосконалення розрахункових математичних алгоритмів для визначення ключових параметрів водного потоку, що дозволить сформувати надійну аналітичну базу для планування заходів захисту населення та територій.

Огляд літератури

У статтях (Byaruhanga, N., 2024; Rajab, A., 2023, Li, W., 2024) автори пропонують гібридні моделі, що зосереджуються на використанні історичних метеорологічних даних для виявлення тенденцій за допомогою методів машинного навчання та глибокого навчання з метою оцінки кількості опадів. Їхні моделі засновуються на історичних статистичних даних, мережах датчиків дистанційного спостереження та прогнозах опадів. Проте дані моделі працюють локально,

оскільки необхідні для навчання алгоритмів дані є обмежені, залежать від високоякісних даних і потребують подальшої структурної оптимізації для зменшення обчислювальної складності та підвищення ефективності прогнозу на довготривалий період.

Автори статей (Zheng, X., 2023; Tian, D., 2022) проаналізували причинно-наслідкові зв'язки аварійних ситуацій на гідроспорудах і визначили, що найчастішими причинами аварій на таких об'єктах є людський фактор. В наслідок цього автори стверджують, що найбільш дієвим способом попередження аварій є навчання персоналу та підвищення їх кваліфікації. Проте автори не розглядали причини технічного зношення обладнання та споруд, оскільки аналізували відносно нові або недавно споруджені конструкції.

В роботах (Kotsiuruba, V., 2023; Коцюруба, В., 2024) обґрунтовано актуальність прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах та нагальну потребу в ефективному науково-методичного апараті для проведення розрахунків та моделювання наслідків гідротехнічних аварій. В статті автори також провели верифікацію запропонованої методики, проте вона не враховує інженерно-технічні споруди, що вже створені на досліджуваній території.

Крім математичного моделювання прогнозованих параметрів затоплення на сьогоднішній день широко використовуються і комп'ютерні моделі, що на перший погляд виглядають зручнішими та ефективнішими. В роботах (Senthilkumar, P., 2023; de Sousa, M., 2022) автори представляють комп'ютерну модель прогнозування затоплення територій за допомогою різноманітних програмних комплексів, які використовуються для вирішення проблеми міських повеней. Автори акцентують увагу на застосуванні методів глибокого навчання з їхньою величезною ефективністю в галузі комп'ютерного зору та обробки зображень для прогнозування міських повеней шляхом їх інтеграції з методологією на основі ГІС. Одночасно автори визнають, що дана модель не буде достатньо ефективна для застосування на не урбаністичних територіях. В роботах (Havrys, A., 2024; Shen, Y., 2023) комп'ютерні моделі застосовуються лише двовимірні гідродинамічні моделі для забезпечення числової точності, тоді як повністю розподілена гідрологічна модель застосовується до областей незатоплення для підвищення обчислювальної ефективності. Як стверджують автори подальші дослідження повинні бути зосереджені на розробці процедури динамічного двонаправленого зв'язку, яка може точно відображати складні фізичні взаємодії між опадами та стоком вище за течією та місцевим процесом затоплення. Тому їхні моделі потребують подальшого удосконалення.

В роботі (Гаврись, А., 2025) проведено дослідження щодо комплексної оцінки та ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд для подальшого впровадження організаційно-технічних заходів захисту, орієнтованих на мінімізацію наслідків можливих аварій, а в роботі (Kobylkin, D., 2025) розроблено алгоритм впровадження заходів захисту для конкретного регіону. Але оскільки автори засновувалися на статистичних показниках і комп'ютерному моделюванні їхні дослідження не враховували вже існуючі заходи інженерного захисту територій. Загалом поєднання математичного моделювання параметрів затоплення, комп'ютерного моделювання та прийняття управлінських рішень щодо планування заходів захисту від затоплення є складною задачею і потребує подальшого удосконалення і розвитку.

Над проблемою прийняття ефективних управлінських рішень щодо планування заходів захисту від надзвичайних ситуацій працювало багато вчених. Так у статті (Kolen, B., 2018) автори описують метод під назвою "Діаграма евакуації" для підтримки планування евакуації та прийняття рішень на основі ризиків. Це дозволяє ефективно планувати евакуацію населення у масштабних надзвичайних ситуаціях, таких як повінь. Однак евакуація є лише частиною загальних повноважень керівника ліквідації надзвичайної ситуації, і в ситуації повені система прийняття управлінських рішень вимагає комплексного підходу.

У роботі (Rehman, J., 2019) розглядається комплексний набір збору інформації, такої як експертні думки, статистичні дані та аналіз різних соціальних, технічних, інституційних, культурних, інфраструктурних та екологічних факторів, що сприяють виникненню повеней. Автори перевірили цю ідею на прикладі повені, яка сталася в Пакистані у 2010 році, і дійшли висновку, що наявності достатньої інформації про надзвичайну ситуацію кількість жертв може бути зменшена в кілька разів завдяки створенню інженерно-технічних заходів цивільного захисту. На основі цього ми робимо висновок, що ідея створення бази даних про повені як частини інформаційної системи для підтримки прийняття управлінських рішень керівниками ліквідації надзвичайних ситуацій гідрологічного походження буде надзвичайно корисною.

У дослідженні (Li, Z., 2019) вперше було створено комплексну систему оцінки стійкості до повеней для міст з усім циклом стихійного лиха, що охоплює стійкість до повеней, здатність до подолання та відновлення після повені, а також здатність до адаптації після повені. Ця система була практично застосована та постійно доповнюється відповідно до рекомендацій експертів. Однак ця система ще не враховує немиські території, такі як сільськогосподарські угіддя, заповідники, рекреаційні зони тощо, які мають інші важливі аспекти з точки зору запобігання та ліквідації надзвичайної ситуації гідрологічного походження.

У роботах (Estelaji, F., 2023; Havrys, A., 2023) описано та проаналізовано пріоритети різних доступних інноваційних рішень, які мають достатній потенціал для корисності та використання на практиці. Одним із висновків, який декларують автори, є те, що використання ГІС-технологій сьогодні є життєво важливим інструментом у прийнятті управлінських рішень, особливо для керівника ліквідації надзвичайної ситуації гідрологічного походження.

Методологія дослідження

Методологія проведення досліджень базується на поетапному підході, що передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних розрахунково-аналітичних процедур для прогнозування параметрів затоплення внаслідок природних повеней та гідродинамічних аварій. На першому етапі здійснюється аналіз геоморфологічних характеристик русел річок та технічних параметрів гідроспоруд із метою схематизації розрахункових профілів (трикутних чи параболических) і визначення вихідних гідрологічних даних (витрат води, інтенсивності опадів, об'ємів водосховищ). На другому етапі застосовується комплекс методів математичного та гідродинамічного моделювання для розрахунку ключових просторово-часових параметрів водного потоку (висоти, швидкості руху, часу добігання та тривалості проходження хвилі прориву), при цьому алгоритм обов'язково враховує захисний і стримувальний ефект наявних інженерних споруд. На третьому етапі виконується оцінювання руйнівної дії гідропотоку на об'єкти інфраструктури та життєзабезпечення з використанням емпіричних метрик, що базуються на залежностях між глибиною затоплення, швидкістю течії та тривалістю стояння води. На завершальному етапі здійснюється просторова та кількісна інтерпретація отриманих результатів для формування розрахунково-аналітичної бази, що слугуватиме основою для розроблення планів попередження та реагування, оптимізації алгоритмів евакуації населення і прийняття управлінських рішень у сфері цивільного захисту.

Результати дослідження

При прогнозуванні наслідків затоплення від природних чинників схематично перетин русла річки можна уявити або трикутним перетином (рис. 1а), або перетином параболическої форми (рис. 1б).

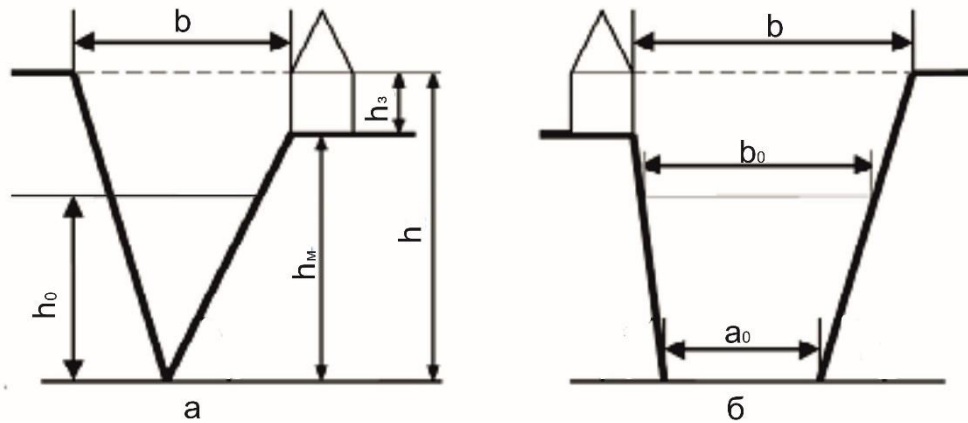


Рисунок 1: Розрахункові схеми перерізу річки:

а – трикутний переріз, б – параболический переріз: a_0 – ширина дна ріки; b_0, b – ширина ріки до і під час повені; h_0, h – глибина ріки до і під час повені; h_3 – глибина затоплення; h_m – висота місцевості

Джерело: підготовлено автором за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015)

Витрата води в річці до настання повені Q_0 , м³/с, дорівнює

$$Q_0 = V_0 S_0 \quad (1)$$

де V_0 – швидкість течії води в річці до настання повені, м/с;

S_0 – площа перерізу русла річки до паводка, м², що дорівнює:

$$S_0 = 0,5 b_0 h_0 \text{ – для трикутного перерізу} \quad (2)$$

$$S_0 = 0,5 (a_0 + b_0) h_0 \text{ – для трапецієподібного перерізу} \quad (3)$$

Витрата води після випадання опадів (танення снігу) та настання повені Q_{max} , м³/с, дорівнює:

$$Q_{max} = Q_0 + \frac{JF}{3,6} \quad (4)$$

де J – інтенсивність опадів (танення снігу), мм/год;

F – площа випадання опадів (танення снігу), км².

Висота підйому води в річці під час паводку h , м, незалежно від форми профілю русла річки, визначається за формулою:

$$h = \left(\frac{2Q_{max} h_0^{\frac{5}{3}}}{b_0 V_0} \right)^{3/8} - h_0 \quad (5)$$

Максимальна швидкість потоку води під час повені V_{max} , м/с, дорівнює:

$$V_{max} = \frac{Q_{max}}{S_{max}} \quad (6)$$

де S_{max} – площа поперечного перерізу потоку під час проходження паводку, м², що визначається за формулою:

$$S_{max} = (S_0 + 0,5h(b_0 - a_0)) \left(1 + \frac{h}{h_0} \right) \quad (7)$$

У разі трикутного профілю русла річки слід вважати $a_0 = 0$.

Руйнівна дія повеней визначається глибиною затоплення h_3 , м:

$$h_3 = h - h_m + h_{\text{CІЗ}} \quad (8)$$

де $h_{\text{CІЗ}}$ – висота наявних споруд інженерного захисту територій, при відсутності такого захисту $h_{\text{CІЗ}} = 0$.

Максимальна швидкість потоку затоплення V_3 , м/с:

$$V_3 = V_{\text{max}} f \quad (9)$$

Параметр віддаленості об'єкта від русла річки f визначається за таблицею 1.

Таблиця 1: Значення параметра f

h_3/h	Перетин русла		
	Прямокутний	Параболічна	Трикутна
0,1	0,2	0,23	0,3
0,2	0,38	0,43	0,5
0,4	0,6	0,64	0,72
0,6	0,76	0,84	0,96
0,8	0,92	1,05	1,18
1,0	1,12	1,2	1,32

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015) та Коцюруба, В. (2024)

Руйнівну дію хвилі паводкового затоплення можна оцінити за таблицею 2.

Таблиця 2: Значення параметрів хвилі затоплення, що призводять до руйнувань об'єктів

Найменування об'єкта	Ступінь руйнування					
	Сильний		Середній		Слабкий	
	v , м/с	h , м	v , м/с	h , м	v , м/с	h , м
Дерев'яні будинки (1...2 поверхи)	3,5	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0
Цегляні малоповерхові будинки (1...3 поверхи)	4,0	2,4	3,0	2,0	2,0	1,0
Промислові будівлі з легким металевим каркасом та будівлі безкаркасної побудови	5,0	2,5	3,5	2,0	2,0	1,0
Цегляні будинки середньої поверховості (4 поверхи)	6,0	3,0	4,0	2,5	2,5	1,5
Промислові будівлі з важким металевим або з/б каркасом	7,5	4,0	6,0	3,0	3,0	1,5
Бетонні та залізобетонні будівлі, будівлі антисейсмічної конструкції	12,0	4,0	9,0	3,0	4,0	1,5
Залізобетонні мости	2,0	3,0	1,0	2,0	0,0	0,5
Металеві мости та шляхопроводи з прольотом (30...100 м)	2,0	3,0	1,0	2,0	0,0	0,5
Залізничні колії	2,0	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5
Шосейні дороги з асфальтовим та бетонним покриттям	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015) та Коцюруба В. (2024)

Повінь та паводок мають тривалий вплив, що посилює початковий руйнівний вплив хвилі затоплення в залежності від часу (таблиця 3).

Таблиця 3: Частка пошкоджених об'єктів (%) на затоплених територіях під час великих повеней ($V_3=3-4$ м/с)

Об'єкт	Час затоплення, год.					
	1	2	3	4	24	48
Затоплення підвалів, укриттів	10-15	15-20	40-45	60-65	85-90	90-95
Порушення дорожнього руху	15-20	30-35	60-65	75-80	95-100	100
Руйнування вуличного покриття	-	-	3-5	6-10	30-35	50-55
Змив дерев'яних будинків	-	7-10	70-75	90-95	100	100
Руйнування цегляних будівель	-	-	10-15	40-45	50-55	60-65
Припинення електроживлення	75-80	90-95	90-95	100	100	100
Пошкодження систем газо- та тепlopостачання	-	-	7-10	10-15	30-35	70-75
Знищення врожаю	-	-	-	-	3-10	8-15

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015) та Гавриць А. (2025)

Примітка: при $V_3 = 1,5-2,5$ м/с наведені в таблиці значення необхідно помножити на 0,6; при $V_3 = 4,5-5,5$ м/с — помножити на 1,4.

Під час прогнозування та оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд (ГТС) критично важливо враховувати їхні специфічні характеристики та потенційні уражаючі фактори. Згідно з ДБН В.2.4-3:2025 «Гідротехнічні споруди. Основні положення», ГТС визначаються як інженерні об'єкти, що функціонують в умовах постійного впливу водного середовища і призначені для раціонального використання та охорони водних ресурсів, а також для запобігання їхньому шкідливому впливу.

На сучасному етапі значна частина вітчизняного фонду водосховищ перебуває в експлуатації 50–60 і більше років, що зумовлює високий ступінь їхнього фізичного зносу та морального старіння. Експлуатаційний період понад 30 років є критичним маркером зниження рівня техногенної безпеки подібних об'єктів. Світова статистика підтверджує пряму кореляцію між віком ГТС (понад 30–40 років) та підвищенням імовірності виникнення аварійних ситуацій. Додатковим дестабілізуючим фактором є несанкціонована забудова територій гідровузлів у зонах періодичного затоплення. Це експоненціально збільшує ризики виникнення надзвичайних ситуацій, особливо під час проходження паводків або внаслідок гідродинамічних аварій.

Гідродинамічна аварія трактується як порушення цілісності ГТС, що супроводжується високошвидкісним поширенням водних мас та формує загрозу виникнення техногенної надзвичайної ситуації. Деструкція гідротехнічних споруд може бути ініційована низкою екзогенних та ендогенних чинників:

- екстремальними природними явищами (землетруси, урагани, зсуви та обвали);
- конструктивно-технологічними дефектами та порушенням регламенту експлуатації;
- екстремальним гідрологічним навантаженням (паводки) або деградацією ґрунтової основи;
- недостатньою пропускною здатністю водоскидів;
- цілеспрямованим вогневим ураженням (в умовах воєнного стану).

У разі прориву греблі формується проран, геометричні параметри якого детермінують об'єм і швидкість транзиту водних мас із верхнього б'єфа в нижній, а також визначають

гідродинамічні характеристики хвилі прориву. Наслідком такої деструкції є катастрофічне затоплення — стрімке покриття прилеглих територій водою, спричинене проходженням хвилі прориву. Масштаб деструктивних наслідків є багатофакторною функцією, що залежить від технічного стану гідровузла, морфології руйнування греблі, гідростатичних запасів водосховища, просторово-часових параметрів хвилі прориву, топографічних особливостей місцевості, а також гідрометеорологічних умов та часу доби на момент аварії.

До ключових уражаючих факторів катастрофічного затоплення належать просторово-часові параметри хвилі прориву (зокрема, її максимальна висота та швидкість поширення), а також загальна тривалість індукованого затоплення.

Хвиля прориву ідентифікується як нестационарний водний потік фронтального типу, що утворюється в зоні прорану, характеризується значною амплітудою гребеня, високою кінетичною енергією та екстремальною руйнівною здатністю. Її формування зумовлене суперпозицією двох фізичних процесів: гравітаційним скидом води з верхнього б'єфа та локальним акумулюванням водних мас у зоні падіння, що ініціює інтенсивний масоперенос у напрямку нижчих гіпсометричних відміток.

У контексті гідравліки хвиля прориву класифікується як хвиля переміщення. На відміну від осциляторних вітрових хвиль на поверхні водойм, вона забезпечує поступальний масоперенос значних об'ємів води. Відповідно, її доцільно моделювати як безперервно еволюціонуючу масу рідини, що зазнає просторово-часових трансформацій профілю, габаритів та вектора швидкості під час руху руслом.

Деструктивний потенціал хвилі прориву реалізується через такі механізми:

- Гідростатичний удар унаслідок раптового градієнта рівнів води між б'єфами під час руйнування напірного фронту.
- Прямий динамічний тиск високошвидкісного водного потоку.
- Деградація фізико-механічних властивостей ґрунтової основи споруд через інтенсивну фільтрацію та водонасичення.
- Масштабна гідрологічна ерозія та переміщення значних об'ємів ґрунту.
- Кінетичний вплив твердого стоку та уламків зруйнованої інфраструктури, що транспортуються потоком.

За характером впливу на інженерні споруди хвиля прориву виявляє фізичну аналогію з ударною хвилею повітряного ядерного вибуху, за винятком того, що робочим середовищем у цьому випадку виступає нестримний потік. Просторова структура потоку є багатовимірною: базові гідродинамічні параметри хвилі (глибина, ширина, поле швидкостей) є функціями не лише поздовжньої координати та часу, а й поперечного перерізу, що обумовлює високу топологічну складність гідродинамічного процесу.

Оскільки хвиля прориву є основним руйнівним фактором під час руйнування гідротехнічної споруди, то для визначення показників обстановки в зоні катастрофічного затоплення необхідно визначити її параметри.

Основними параметрами хвилі прориву є її висота $H_{хп}$, м; середня швидкість руху V , км/год; час добігання хвилі прориву до розрахункових перетинів річки t , год; тривалість проходження хвилі через ці перетини T , год.

Вихідними даними для розрахунку цих параметрів є:

- глибина водосховища перед греблею, H , м;
- ширина водосховища перед греблею B , м;
- площа дзеркала водосховища S , м²;
- глибина річки нижче греблі h , м;
- висота наявних споруд інженерного захисту територій $h_{СІЗ}$, м;
- швидкість течії річки V_p , м/с;

гідравлічний ухил дна річки i (перепад у метрах висоти рівня дна річки на 1000 м її довжини);

ширина прорану – пролому в конструкції греблі B_i , м, а також відносна його ширина $\tilde{B}_i$.
За розмірами водосховища можна розрахувати його об'єм в м^3 :

$$W = \frac{HS}{3} \quad (10)$$

а також час повного спорожнення водосховища внаслідок руйнування греблі $T_{\text{ПС}}$, год:

$$T_{\text{ПС}} = \frac{WA}{3600\mu B_i H \sqrt{H}} \quad (11)$$

де $A \approx 2$ — коефіцієнт кривизни форми водосховища;
 m — параметр, що характеризує форму русла річки (при параболічній формі русла та заплави річки $m = 0,6$).

При моделюванні утворення та руху хвилі прориву приймаються такі основні припущення:

руйнування греблі гідровузла відбувається миттєво;

при частковому руйнуванні греблі вважається, що утворюється один прорив, який знаходиться в найглибшому місці та сягає дна водосховища;

форма та розміри прориву з часом не змінюються;

річка по всій своїй довжині вважається такою, що складається з ділянок з однорідними, тобто незмінними на протязі даної ділянки, ширинами, глибинами, ухилами та середніми швидкостями руху хвилі прориву (таблиця 4).

Таблиця 4: Середня швидкість руху хвилі прориву, км/год

Характеристика русла та заплави	$i = 0,01$	$i = 0,001$	$i = 0,001$
На річках із широкою затоплюваною заплавою	4–8	1–3	0,5–1
На звивистих річках	8–14	3–8	1–2
На річках із добре розробленим руслом (пойми середні без великого опору)	14–20	8–12	2–5
На слабозрозвинених річках (заплави вузькі, береги круті)	–	12–16	5–10

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015) та Kotsiuruba V. (2023)

Розрахунок параметрів хвилі прориву здійснюється в такому порядку:

1. Визначення висоти хвилі прориву межах руйнувань греблі (перший переріз):

$$H_{\text{ХП1}} = 0,6H - h + h_{\text{СІЗ}} \quad (12)$$

2. Визначення часу проходження хвилі прориву через переріз зруйнованої греблі, що дорівнює часу повного спорожнення водосховища:

$$T_1 = T_{\text{ПС}} \quad (13)$$

3. Визначення характеристик руху хвилі прориву на першій ділянці:

а) за таблицею 4 визначаємо середню швидкість хвилі на першій ділянці V_1 ;

б) визначаємо час проходження хвилі прориву до другого перерізу:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1} \quad (14)$$

де L_1 — довжина першої ділянки річки.

в) знаходимо відношення часу проходження хвилі прориву до другого перерізу до часу проходження хвилі через перший переріз t_1/T_1 і за його величиною за допомогою таблиці 5 знаходимо значення відношень $H_{хп2}/H_{хп1}$ і T_2/T_1 .

Таблиця 5: Значення співвідношення висоти хвилі прориву та тривалість її проходження через перерізи

t_1/T_1	$H_{хп2}/H_{хп1}$	T_2/T_1
0,00	1	1
0,1	0,9	1,1
0,25	0,8	1,3
0,40	0,7	1,5
0,55	0,6	1,6
0,7	0,5	1,7
0,95	0,4	1,9
1,25	0,3	2,2
1,5	0,3	2,6
>2	0,3	3

Джерело: підготовлено авторами за матеріалами дослідження Стародуб Ю. (2015) та Kotsiuruba V. (2023)

Якщо значення відношення t_1/T_1 потрапляє в інтервал між двома сусідніми табличними значеннями, то для визначення величини інших відношень слід скористатися методом лінійної інтерполяції. Введемо позначення: $t_1/T_1 = x$, $H_{хп2}/H_{хп1} = y$, $T_2/T_1 = z$.

Нехай $x_1 < x < x_2$. Тоді:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1); \quad z = z_1 + \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (15)$$

Висота хвилі прориву у другому перерізі та час проходження хвилі через другий переріз визначаються за формулами:

$$H_{хп2} = Hy + h_{сиз}; \quad T_2 = T_1 z; \quad (16)$$

Розрахунок руху хвилі прориву на наступних ділянках буде розраховуватися відповідно.

За результатами розрахунку будується графік проходження хвилі прориву. На основі цього графіка проводиться оцінка можливих наслідків затоплення та визначаються вихідні дані для планування заходів із захисту населення, територій та створення інженерно-технічних заходів цивільного захисту. Зокрема, визначається час t_e , протягом якого можлива евакуація, визначаються тривалість і площа затоплення, а також параметри хвилі прориву в будь-якому заданому перерізі.

Ступінь руйнування будівель і споруд під впливом гідропотоку хвилі прориву визначається величиною питомого хвильового навантаження. Будівлі та споруди зазнають — залежно від величини питомого хвильового навантаження — слабкого, середнього, сильного та повного руйнування.

Знаючи висоту хвилі та швидкість руху хвилі прориву, ступінь руйнування можна визначити за таблицями 2 і 3.

У результаті дослідження систематизовано комплекс математичних алгоритмів для розрахунку ключових параметрів затоплення як природного, так і техногенного характеру. Отримані аналітичні залежності та емпіричні дані дозволяють просторово та в часі прогнозувати динаміку водного потоку, оцінювати ступінь потенційного руйнування інфраструктури і визначати резерв часу для безпечної евакуації. Практичне застосування цієї розрахункової бази формує науково обґрунтоване підґрунтя для розроблення планів

реагування, оптимізації заходів цивільного захисту та проектування захисних інженерних споруд.

Обговорення

Отримані результати свідчать, що прогнозування наслідків гідрологічних надзвичайних ситуацій не може обмежуватися лише статичною констатацією ймовірних меж розливу води. На відміну від спрощених підходів, які часто ігнорують просторово-часову динаміку водного потоку, розвиток ситуації як при природних повенях, так і при гідродинамічних аваріях визначається складною взаємодією гідрологічних, топографічних та інфраструктурних чинників. Це обумовлює необхідність розгляду зони катастрофічного затоплення як багатокомпонентної системи, де параметри потоку (швидкість, глибина, висота хвилі прориву), геоморфологічні особливості русла (зокрема, розрахункові трикутні чи параболічні перерізи) та наявні захисні споруди перебувають у постійному взаємовпливі. Таке бачення узгоджується з сучасними тенденціями у сфері цивільного захисту, що наголошують на необхідності переходу від ситуативного реагування до проактивного управління ризиками.

Запропонований розрахунково-аналітичний апарат дозволяє подолати фрагментарність в оцінці руйнівної дії гідропотоку, об'єднавши визначення гідравлічних параметрів та оцінку ступеня руйнування об'єктів у єдиний прогностичний цикл. Його суттєва відмінність від класичних методик полягає у системному врахуванні захисного ефекту вже зведених інженерних споруд та часового фактора, який, як доведено розрахунками, критично посилює початковий руйнівний вплив хвилі на будівлі та комунікації. Такий підхід дає змогу органам управління не просто моделювати абстрактну загрозу, а чітко визначати час добігання хвилі прориву до конкретних рубежів, оптимізуючи алгоритми евакуації та визначаючи безпечні зони. Це створює надійне підґрунтя для розроблення ефективних планів попередження та реагування територіальних громад в умовах обмежених ресурсів.

Разом з тим, результати дослідження мають певні обмеження, притаманні математичному моделюванню макропроцесів. Базові припущення, закладені в основу розрахунків, такі як незмінності розмірів прорану або усереднення швидкості на окремих ділянках русла, є ідеалізованими умовами. На практиці рух хвилі переміщення може ускладнюватися вторинними факторами: розмивом берегів, утворенням заторів чи зміною заплави. Тому запропонована технологія розрахунку є фундаментальною концептуальною основою, яка для підвищення просторової точності потребує подальшої верифікації та інтеграції з сучасними геоінформаційними системами на базі цифрових моделей рельєфу конкретних гідровузлів.

Висновки

У статті науково обґрунтовано та систематизовано комплекс математичних моделей і розрахункових алгоритмів для прогнозування ключових параметрів затоплення, спричиненого екстремальними природними повенями та гідродинамічними аваріями. Запропонований розрахунково-аналітичний апарат дозволяє з високою достовірністю визначати просторово-часові характеристики нестационарного водного потоку, зокрема його глибину, швидкість, висоту та час добігання хвилі прориву. Важливою практичною особливістю удосконаленої моделі є параметричне врахування стримувального та захисного ефекту вже наявних на території інженерних споруд, що суттєво підвищує об'єктивність оцінки реальної зони ураження.

Практична реалізація розробленої методології формує надійну аналітичну базу, критично необхідну для якісного планування заходів цивільного та інженерного захисту. Розраховані метрики руйнівної дії гідропотоку, з огляду на його кінетичну енергію та тривалість стояння води, дають змогу органам місцевого самоврядування і підрозділам ДСНС

України завчасно визначати безпечну зону, оптимізувати алгоритми евакуації населення та мінімізувати деструктивний вплив на критичну інфраструктуру при складанні планів попередження і реагування. Це забезпечує концептуальний перехід управління безпекою від ситуативного реагування до проактивного запобігання ризикам.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі полягають в алгоритмізації та інтеграції запропонованих математичних моделей із сучасними геоінформаційними системами та високоточними цифровими моделями рельєфу. Крім того, актуальним науковим завданням є розширення моделі шляхом введення до розрахунків вторинних гідродинамічних факторів — руслової ерозії, ймовірності утворення заторів твердого стоку та динамічної зміни шорсткості заплав, що дозволить підвищити просторову точність прогнозування для територій зі складними геоморфологічними умовами.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел

- [1] Byaruhanga, N., Kibirige, D., Gokool, S., & Mkhonta, G. (2024). Evolution of Flood Prediction and Forecasting Models for Flood Early Warning Systems: A *Scoping Review*. *Water*, 16(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w16131763>.
- [2] de Sousa, M. M., de Oliveira, A. K. B., Rezende, O. M., de Magalhães, P. M. C., Pitzer Jacob, A. C., de Magalhães, P. C., & Miguez, M. G. (2022). Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation. *Journal of Hydroinformatics*, 24(5), 976–991. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.174>.
- [3] Estelaji, F., Aghajari, A. A., & Zahedi, R., 2023. Flood zoning and developing strategies to increase resilience against floods with a crisis management approach. *Asian Review of Environmental and Earth Sciences*, 10(1), 14–27. <https://doi.org/10.20448/arees.v10i1.4439>.
- [4] Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., Tur, N., 2023. Visualization of fire in space and time on the basis of the method of spatial location of fire-dangerous areas. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. <https://doi.org/10.12912/27197050/156971>.
- [5] Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., Tur, N. (2024). Use of the computer modelling for the analysis of dangerous areas during flooding of territories. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4). DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/184265>.
- [6] Kobylkin, D., Havrys A., Rogulia, A., Sodoma, R., Pavuk, I., Avdieyeva, K., & Filippova, V. (2025). Safety-oriented management of protection projects of critical infrastructure objects. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 47(4), 537–548. <https://doi.org/10.15544/mts.2025.42>.
- [7] Kolen, B., & Van Gelder, P. H. A. J. M., 2018. Risk-based decision-making for evacuation in case of imminent threat of flooding. *Water*, 10(10), 1429. <https://doi.org/10.3390/w10101429>.
- [8] Kotsiuruba, V., Mykhailovskyi, D., Cherevko, R., Kamalov, Y., & Proshchyn, I. (2023). Simulation of flood inflammation due to destruction of hydrotechnical structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (111), 87–101. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.87-101>.

- [9] Li, W., Liu, C., Xu, Y., Niu, C., Li, R., Li, M., & Tian, L. (2024). An interpretable hybrid deep learning model for flood forecasting based on Transformer and LSTM. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101873. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101873>.
- [10] Li, Z., Zhang, X., Ma, Y., Feng, C., & Hajiyev, A., 2019. A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101140>.
- [11] Rajab, A., Farman, H., Islam, N., Syed, D., Elmagzoub, M. A., Shaikh, A., Akram, M., & Alrizq, M. (2023). Flood Forecasting by Using Machine Learning: A Study Leveraging Historic Climatic Records of Bangladesh. *Water*, 15(22), 3970. <https://doi.org/10.3390/w15223970>.
- [12] Rehman, J., Sohaib, O., Asif, M., & Pradhan, B., 2019. Applying systems thinking to flood disaster management for a sustainable development. *International journal of disaster risk reduction*, 36, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101101>.
- [13] Senthilkumar, P., & Arthur, M. P. (2023). A review of intelligent models for mapping city development and urban flooding. *Land Degradation & Development*, 34(13), 3793-3809. <https://doi.org/10.1002/ldr.4742>.
- [14] Shen, Y., & Jiang, C. (2023). A comprehensive review of watershed flood simulation model. *Natural Hazards*, 118(2), 875-902. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06047-1>.
- [15] Tian, D., Liu, H., Chen, S., Li, M., & Liu, C. (2022). Human error analysis for hydraulic engineering: Comprehensive system to reveal accident evolution process with text knowledge. *Journal of construction engineering and management*, 148(9), 04022093. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002366).
- [16] Zheng, X., Liu, Y., & Shao, B. (2023). Causal Analysis of Fall Accidents in Hydraulic Engineering Based on Text Mining and Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory and Interpretative Structural Modeling. *Water*, 15(21), 3810. <https://doi.org/10.3390/w15213810>.
- [17] Гаврись А.П., Пекарська О.О., Веселівський Р.Б. (2025). Концепція та методологія формування планів попередження та реагування на затоплення для територіальних громад України. (2025). *Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія»*, 6(194), 370-384. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-370-384>.
- [18] Гаврись, А. і Філіппова, В. (2025). Комплексне ранжування енергетичних і гідротехнічних споруд України за рівнем безпеки. *Повітряна міць України*. 2, 9 (Лют 2026), 96–107. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-96-107>.
- [19] Коцюрuba, В., & Процин, І. (2024). Удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час зруйнування гідротехнічних споруд. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 49(1), 69-76. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-69-76>.
- [20] Стародуб Ю.П., Гаврись, А. П. (2015). Ініціювання проектів підвищення стану безпеки територій засобами математичного моделювання повеней. *Збірник наукових праць «Вісник ЛДУ БЖД»*, Львів, 2015, №11, 96-100.

References

- [1] Byaruhanga, N., Kibirige, D., Gokool, S., & Mkhonta, G. (2024). Evolution of Flood Prediction and Forecasting Models for Flood Early Warning Systems: A Scoping Review. *Water*, 16(13), 1763. <https://doi.org/10.3390/w16131763>.
- [2] de Sousa, M. M., de Oliveira, A. K. B., Rezende, O. M., de Magalhães, P. M. C., Pitzer Jacob, A. C., de Magalhães, P. C., & Miguez, M. G. (2022). Highlighting the role of the model user and physical interpretation in urban flooding simulation. *Journal of Hydroinformatics*, 24(5), 976-991. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.174>.

- [3] Estelaji, F., Aghajari, A. A., & Zahedi, R., 2023. Flood zoning and developing strategies to increase resilience against floods with a crisis management approach. *Asian Review of Environmental and Earth Sciences*, 10(1), 14-27. <https://doi.org/10.20448/arees.v10i1.4439>.
- [4] Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., Tur, N., 2023. Visualization of fire in space and time on the basis of the method of spatial location of fire-dangerous areas. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. <https://doi.org/10.12912/27197050/156971>.
- [5] Havrys, A., Yakovchuk, R., Pekarska, O., Tur, N. (2024). Use of the computer modelling for the analysis of dangerous areas during flooding of territories. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4). DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/184265>.
- [6] Kobylkin, D., Havrys A., Rogulia, A., Sodoma, R., Pavuk, I., Avdieyeva, K., & Filippova, V. (2025). Safety-oriented management of protection projects of critical infrastructure objects. *Management Theory and Studies for Rural Business and Infrastructure Development*, 47(4), 537–548. <https://doi.org/10.15544/mts.2025.42>.
- [7] Kolen, B., & Van Gelder, P. H. A. J. M., 2018. Risk-based decision-making for evacuation in case of imminent threat of flooding. *Water*, 10(10), 1429. <https://doi.org/10.3390/w10101429>.
- [8] Kotsiuruba, V., Mykhailovskyi, D., Cherevko, R., Kamalov, Y., & Proshchyn, I. (2023). Simulation of flood inflammation due to destruction of hydrotechnical structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (111), 87-101. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.87-101>.
- [9] Li, W., Liu, C., Xu, Y., Niu, C., Li, R., Li, M., ... & Tian, L. (2024). An interpretable hybrid deep learning model for flood forecasting based on Transformer and LSTM. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101873. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101873>.
- [10] Li, Z., Zhang, X., Ma, Y., Feng, C., & Hajiyev, A., 2019. A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101140>.
- [11] Rajab, A., Farman, H., Islam, N., Syed, D., Elmagzoub, M. A., Shaikh, A., Akram, M., & Alrizq, M. (2023). Flood Forecasting by Using Machine Learning: A Study Leveraging Historic Climatic Records of Bangladesh. *Water*, 15(22), 3970. <https://doi.org/10.3390/w15223970>.
- [12] Rehman, J., Sohaib, O., Asif, M., & Pradhan, B., 2019. Applying systems thinking to flood disaster management for a sustainable development. *International journal of disaster risk reduction*, 36, 101101. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101101>.
- [13] Senthilkumar, P., & Arthur, M. P. (2023). A review of intelligent models for mapping city development and urban flooding. *Land Degradation & Development*, 34(13), 3793-3809. <https://doi.org/10.1002/ldr.4742>.
- [14] Shen, Y., & Jiang, C. (2023). A comprehensive review of watershed flood simulation model. *Natural Hazards*, 118(2), 875-902. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06047-1>.
- [15] Tian, D., Liu, H., Chen, S., Li, M., & Liu, C. (2022). Human error analysis for hydraulic engineering: Comprehensive system to reveal accident evolution process with text knowledge. *Journal of construction engineering and management*, 148(9), 04022093. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002366).
- [16] Zheng, X., Liu, Y., & Shao, B. (2023). Causal Analysis of Fall Accidents in Hydraulic Engineering Based on Text Mining and Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory and Interpretative Structural Modeling. *Water*, 15(21), 3810. <https://doi.org/10.3390/w15213810>.
- [17] Havrys, A.P., Pekarska, O.O., Veselivskiy, R.B. (2025). Concept and Methodology for Developing Flood Prevention and Response Plans for Local Communities in Ukraine. (2025). *Municipal Services. Series: "Information Technology and Engineering,"* 6(194), 370–384. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-370-384>.

-
- [18] Havrys, A. and Filippova, V. (2025). Comprehensive Ranking of Ukraine's Energy and Hydraulic Structures by Safety Level. *Ukraine's Air Power*. 2, 9 (Feb. 2026), 96–107. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2025-2-9-96-107>.
- [19] Kotsyuruba, V., & Proshchin, I. (2024). An improved methodology for determining the parameters of breach wave propagation and flooding during the destruction of hydraulic structures. *Modern Information Technologies in Security and Defense*, 49(1), 69–76. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-69-76>.
- [20] Starodub, Yu. P., & Havrys, A. P. (2015). Initiating projects to improve territorial safety through mathematical flood modeling. Collection of scientific papers "*Bulletin of Lviv State University of Life Safety*," Lviv, 2015, No. 11, 96–100.
-



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.