

УДК 627.514

doi:10.31650/2707-3068-2024-28-183-191

АВАРІЇ НА ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ СПОРУДАХ ХВОСТОСХОВИЩ: АНАЛІЗ СТАТИСТИЧНИХ ДАНИХ

Радчук О.Д., аспірант

oleksandr.radchuk@uvkp.com.ua, ORCID 0009-0007-7020-2192

ДІ «УкрНДІводоканалпроект»

Махінко А.В., д.т.н., проф.

makhinko.anton@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0002-9147-7087

Національний авіаційний університет

Анотація. На сучасному етапі розвитку гірничо-добувної промисловості України та закордоном широкого розповсюдження набуло будівництво промислових наливних гідротехнічних споруд – хвостосховищ, призначених для складування мінеральних відходів збагачення (хвостів) та для освітлення води. Аварії на таких спорудах можуть мати катастрофічні наслідки для життя цивільного населення, навколишнього природного середовища та серйозні економічні збитки. Даною роботою узагальнено статистичні дані аварій 373 дамб хвостосховищ в період 1915-2024 рр. Встановлено основні причини виникнення аварій на хвостосховищах та виявлено кореляційні зв'язки між об'ємом виливу хвостів та об'ємом заскладованих хвостів в хвостосховищі.

Ключові слова: хвостосховище, аварія, статистичний аналіз, кореляційний зв'язок, регресійний аналіз.

Вступ. Огороджувальні споруди хвостосховища є найбільш відповідальними спорудами комплексу хвостових господарств гірничо-збагачувальних комбінатів. Обмежена можливість вибору площі під хвостосховища, пов'язана з необхідністю зменшення займаних ними земель, а у зв'язку з цим збільшення ємностей хвостосховищ відбувається за рахунок висоти підпірних споруд, що підвищує ймовірність виникнення аварій. Під аварією дамби хвостосховища мається на увазі її руйнування (часткове або повне) з тих чи інших причин, що супроводжується витіканням заскладованих хвостів.

За даними [1] у світі налічується приблизно 18000 хвостосховищ, з яких 3500 є активними. За останні 100 років частота руйнувань дамб хвостосховищ становить приблизно 1,2% [2].

Рівень аварійності дамб хвостосховищ значно вищий, ніж у традиційних водонапірних гребель з ґрунтових матеріалів (0,01%) [3]. Ґрунтові водонапірні греблі зазвичай будуються відразу на повну висоту і надалі експлуатуються у відносно стабільних проектних режимах. Будівництво огороджувальних споруд хвостосховищ виконується, як правило, поетапно, по мірі заповнення ємності хвостосховища. Тобто здійснюється одночасне будівництво і експлуатація хвостосховища. При цьому в процесі будівництва і експлуатації хвостосховища фізико-механічні характеристики тіла дамби і основи зазнають суттєвих змін, що ускладнює забезпечення високих стандартів якості таких гідротехнічних споруд. Крім того мають місце значні відмінності в конструктивних рішеннях, виборі матеріалів при будівництві дамб та процесів, що протікають в тілі та основі ґрунтових водонапірних гребель та дамб хвостосховищ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У раніше виконаних дослідженнях [4-10] зібрано інформацію про виникнення аварій на хвостосховищах по всьому світу.

Узагальнення статистичних даних аварій хвостосховищ за період 1915-2001 виконано Міжнародною комісією з великих гребель ICOLD (221 випадок аварій дамб хвостосховищ) [3] на основі попередньої бази даних Комісії США з великих гребель (USCOLD) [11], яка збирає велику кількість інформації про випадки в США, що сталися в період 1917-1989 рр. Ця база

даних була доповнена Програмою ООН з навколишнього середовища [12], що включає в себе основні аварії на хвостосховищах в період 1980-1996.

В базі даних ICOLD наведено наступну інформацію по кожному аварійному випадку: місцезнаходження, дата, тип руди, тип дамби, висота дамби, тип матеріалу, об'єм матеріалу, закладованого в хвостосховищі, об'єм виливу матеріалу із хвостосховища на прилеглу територію, довжина шляху руху виливу матеріалу.

Іншою важливою базою даних, що збирає інформацію про останні випадки руйнування дамб хвостосховищ, є Всесвітня інформаційна служба з енергетики (WISE) [13]. База даних містить інформацію про основні аварії на дамбах хвостосховищ, починаючи з 1960 року, та постійно оновлюється.

Додаткові статистичні дані про пошкодження, руйнування та аварії огорожувальних споруд хвостосховищ наведено у [14]. Інформація в даній базі базується на дослідженнях [7]. Цей каталог включає інформацію, представлену в [3], та містить інформацію про аварії на хвостосховищах, які не ввійшли в [13]. Інформація по базі даних була оновлена до 2019 року.

Постановка завдання. При зведенні та експлуатації хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів найбільше уваги приділяється забезпеченню їх надійності та безпеки, так як руйнування даних об'єктів призводить до значних наслідків. Відновлення працездатності дамби хвостосховища, на якому відбулася аварія, потребує значного часу та витрат для проведення ремонтно-відновлювальних робіт по ліквідації аварії. Особливу проблему представляють прориви огорожувальних споруд хвостосховищ з виливом потоку води і розріженого ґрунту із хвостосховища на прилеглу територію з непередбачуваними катастрофічними наслідками для населення та довкілля.

Таким чином, метою роботи було виконання огляду та статистичного аналізу руйнувань та пошкоджень дамб хвостосховищ для виявлення їх причин та вразливих і найменш надійних елементів. Крім того, проведено кореляційний та регресійний аналіз для визначення функціонального зв'язку між об'ємом виливу матеріалу при аварії на хвостосховищі та такими параметрами, як об'єм закладованого матеріалу та висота дамби.

Під час досліджень авторами використано статистичні та аналітичні методи. Обробка і представлення отриманих результатів дослідження виконані із застосуванням сучасних комп'ютерних програмних засобів.

Основний матеріал і результати. В рамках даного дослідження узагальнено статистичну інформацію по аварії, пошкодження і руйнування 373 дамб хвостосховищ різних країнах світу в період 1915-2024 рр. Згідно з оновленою базою даних, частота аварійних ситуацій на хвостосховищах за звітний період складає $\approx 3,42$ аварій на рік.

Хронологічна інформація про аварії на дамбах хвостосховищ наведена на рис. 1. Дані свідчать, що кількість аварій на дамбах хвостосховища залишалася відносно низькою до 1960-х років. Зокрема, у період з 1915 по 1960 рік трапилося 25 аварій з частотою в середньому 0,55 на рік. Дослідженнями відмічається значні сплески збільшенням аварій з 1960 року, що пов'язано зі збільшенням світового видобутку руди в другій половині XX століття, і відповідно об'ємів і та інтенсивності складування хвостів в хвостосховища. Так в період з 1960 по 2000 рік загалом сталося 230 пошкоджень і руйнувань дамб хвостосховищ, що становить приблизно 62% від загальної кількості аварій (5,75 аварій на рік). У 2000-х роках спостерігається зменшення кількості випадків порівняно з минулими десятиліттями, в той час як після 2010 року спостерігається тенденція до зростання кількості інцидентів (5,9 аварій на рік).

Як приклади дуже великих аварій на дамбах хвостосховищ, які сталися останнім часом, слід нагадати:

1) катастрофічне руйнування дамби на руднику Corrego de Feijão в Брумадіньо (штат Мінас-Жейрас, Бразилія) 25 січня 2019 року (рис. 2). Під час аварії загинуло 259 людей. Об'єм виливу матеріалу склав 9,7 млн. м³. Унікальність даного прориву дамби полягає в тому, що момент його початку був знятий на відеокамери, розташовані на прилеглій до хвостосховища

території. Експертна комісія встановила, що прорив дамби і наступний грязевий потік було викликано розрідженням хвостів в дамбі;

2) руйнування дамби Mount Polley (Британська Колумбія, Канада) 4 серпня 2014 року, що призвело до виливу приблизно 25 млн. м³ хвостів та води у водозабірний басейн річки Quesnel.

3) руйнування дамби хвостосховища на алюмінієвому заводі Ajkai Timfoldgyar Zrt в районі міста Айка в 160 км від Будапешту (Угорщина) 4 жовтня 2010 року (рис. 3). В результаті прориву дамби і витоку 1,1 млн. м³ червоного шламу виявилася затопленою територія приблизно 440 тис. м². Загибло 7 людей, ще близько 150 отримали отруєння та хімічні опіки. Розлив забрудненої води зруйнував 300 домівок, було евакуйовано близько 800 жителів міста Айка.

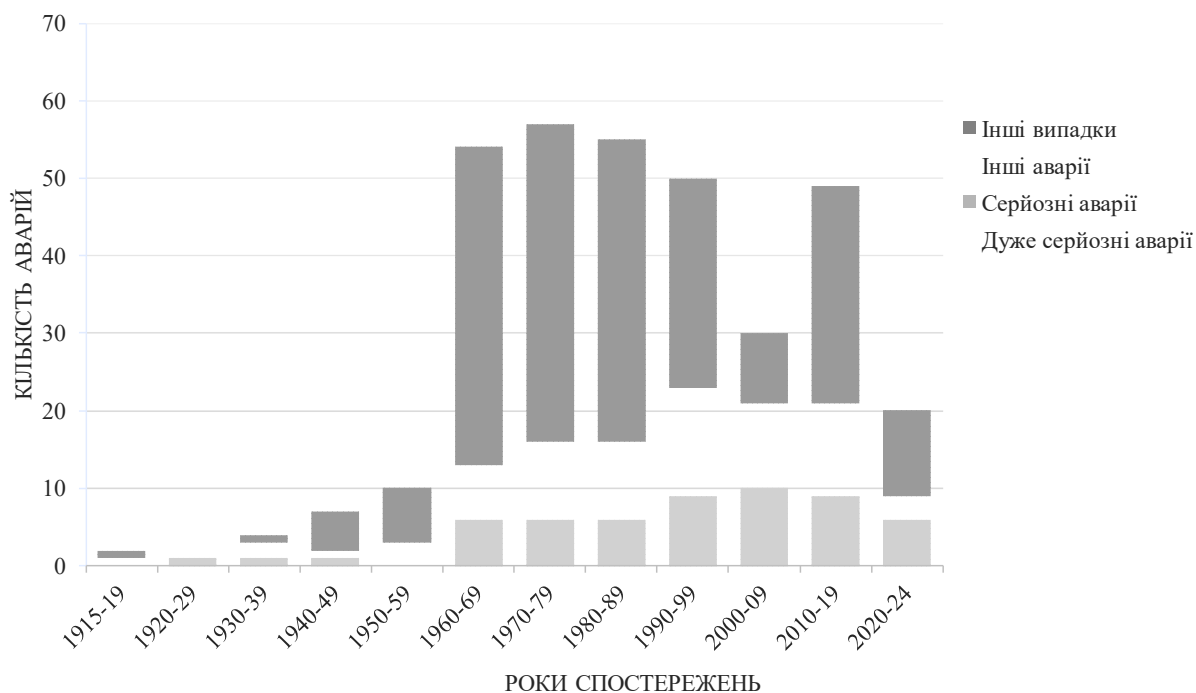


Рис. 1. Розподіл частот аварій на хвостосховищах в часі



Рис. 2. Аварія на дамбі хвостосховища Corrego de Feijão в Брумадіньо 25 січня 2019 року



Рис. 3. Руїнування дамби хвостосховищ Ajkai Timfoldgyar Zrt 4 жовтня 2010 року

Географія аварій на хвостосховищах (рис. 4 та рис. 5) показує, що найбільше аварійних ситуацій відбулося в Північній Америці (41%), де країнами з найбільшою кількістю аварій є США (33%) та Канада (8%). У Південній Америці кількість аварій на хвостосховищах є високою в Чилі (11%), Бразилії (5%) та в Перу (5%). В Азії Китай (6%) та Філіппіни (5%) є також країнами з частими аваріями на дамбах хвостосховищ (5%). В Європі кількість пошкоджень і аварій дамб хвостосховищ є найвищою у Великій Британії (5%).

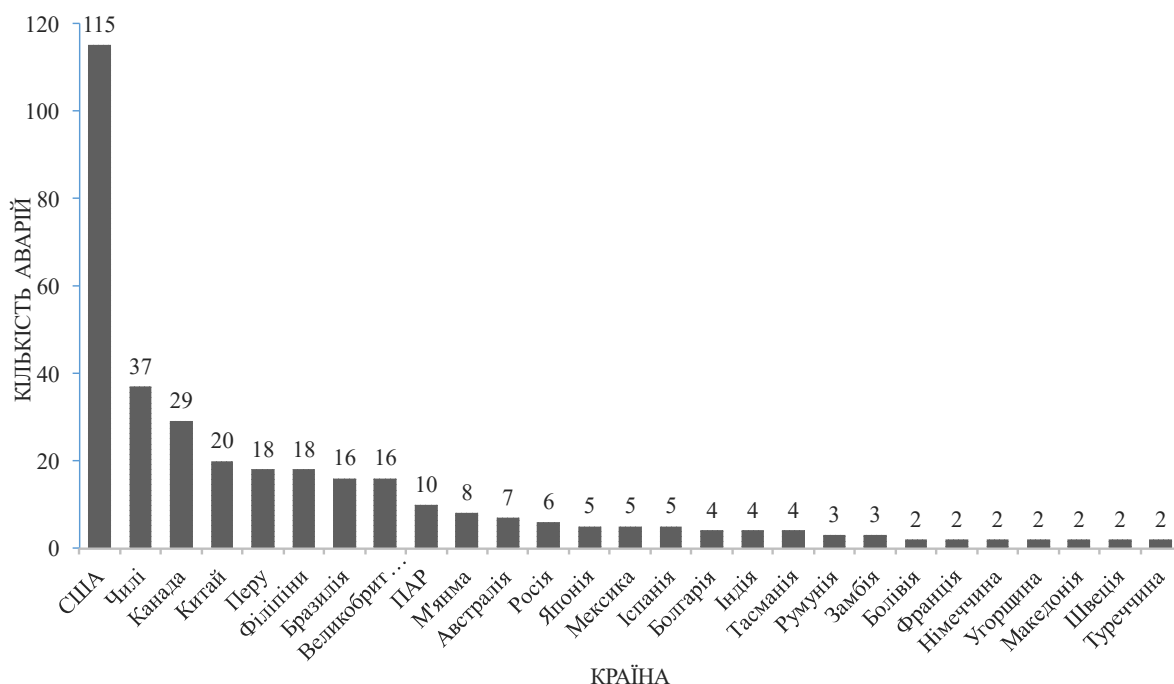


Рис. 4. Розподіл частот аварій на хвостосховищах по країнам

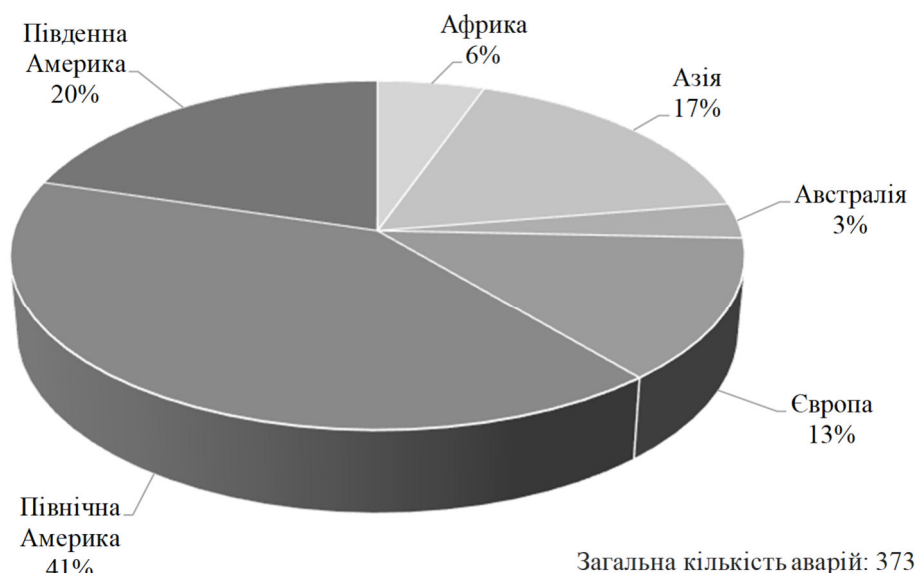


Рис. 5. Розподіл аварій на хвостосховищах по континентах

Аналіз статистичних даних в період 1915-2024 рр. свідчить, що основними причинами руйнувань і пошкоджень дамб хвостосховищ є перелив води через гребінь дамби (21%), порушення стійкості дамби (16%) та сейсмічні впливи (15%). Доволі часто причинами аварій були структурні недоліки (9%), фільтраційні впливи (8%) та порушення основи (7%). Для досить великої кількості аварій хвостосховищ (приблизно 20%) не встановлено їх причини руйнування (рис. 6).



Рис. 6. Відсотковий розподіл основних причин аварій хвостосховищ

Висота дамби хвостосховища є ще одним важливим фактором. В розглянутих даних статистичних аварій хвостосховищ доступна інформація про висоту дамб для 195 випадків. Приблизно 90% аварій пов'язано з дамбами висотою до 50 м, в той час як при висоті дамб понад 100 м – 2%. Найбільш вразливими щодо відмов у роботі виявилися дамби хвостосховищ заввишки 10-20 м – приблизно 28%, 0-10 м – 21% та 20-30 м – 20% (рис. 7).

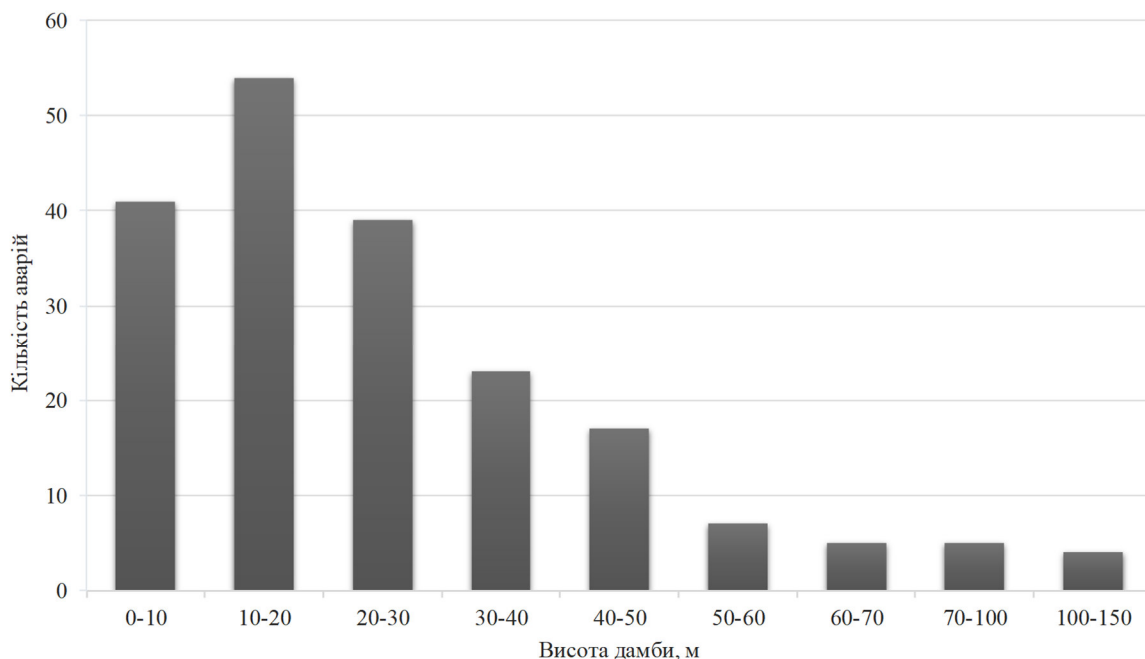


Рис. 7. Кількість аварій дамб хвостосховищ залежно від їх висоти

Вплив руйнування дамби хвостосховища пов'язаний зі значним об'ємом води і розріджених хвостів, які можуть потрапити в навколишнє середовище. Таким чином, даний параметр може бути використаний для оцінки наслідків руйнування дамби хвостосховища. Згідно оновленої бази статистичних даних наявна інформація про 73 випадки щодо об'ємів хвостів, що заскладовано в хвостосховища, та об'ємів виливу хвостів в навколишнє середовище після аварії. Виявлено середній кореляційний зв'язок між даними параметрами (рис. 8). Згідно з регресійним аналізом, зі збільшення об'єму складування хвостів в хвостосховищі на 1% об'єм виливу збільшується на 0,25%. Згідно зі значенням R^2 моделі, 54,5% зв'язку пояснюється використанням об'єму виливу хвостів як змінної відгуку та об'єму складування хвостів як регресора.

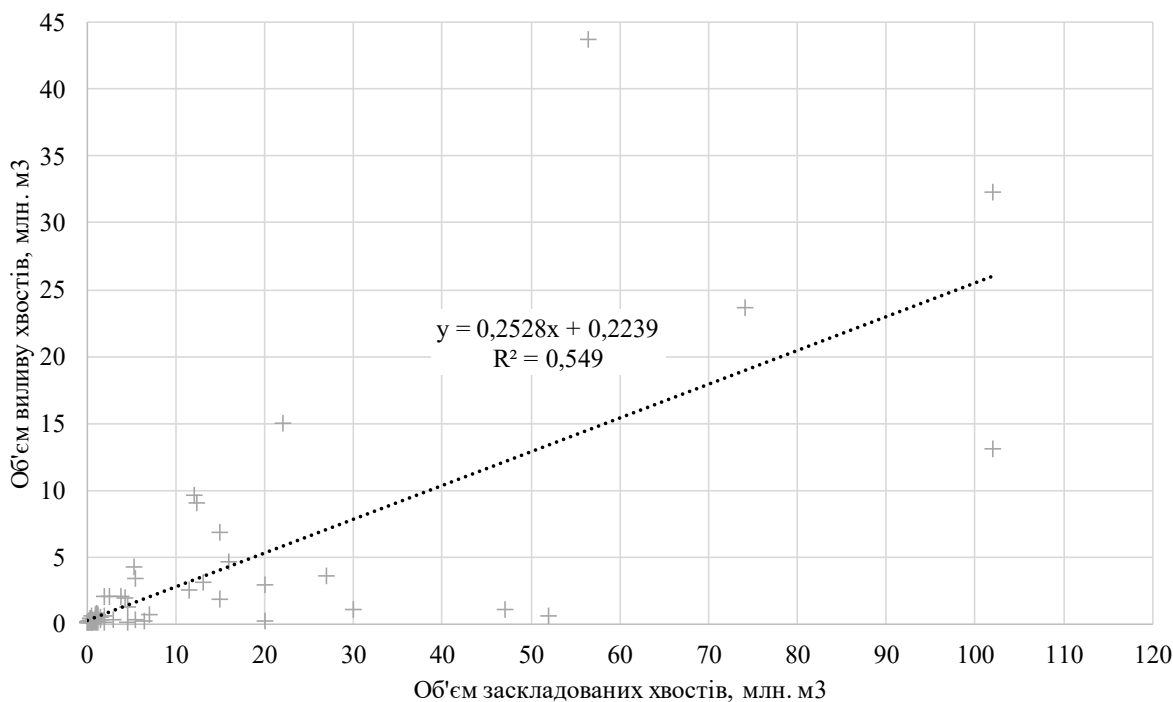


Рис. 8. Кореляційний зв'язок між об'ємом виливу та об'ємом заскладованих хвостів в хвостосховищі

Як видно з рис. 9 спостерігається слабкий кореляційний зв'язок між об'ємом виливу хвостів та висотою дамби хвостосховища.

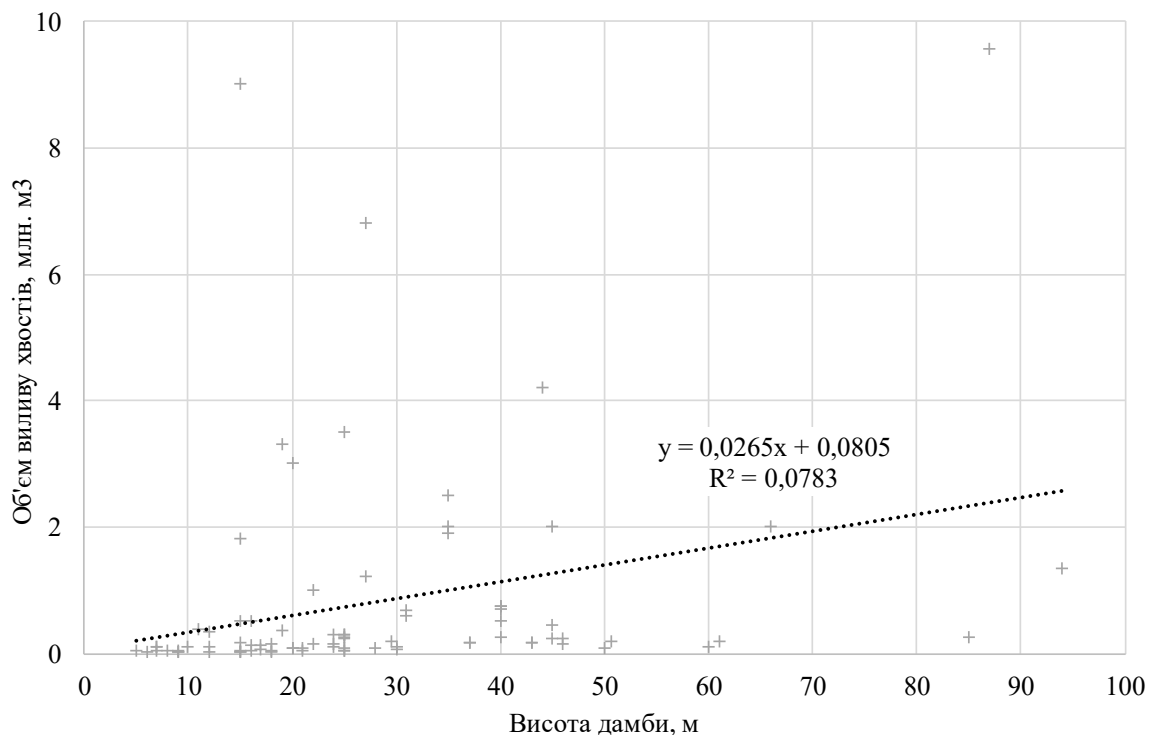


Рис. 9. Кореляційний зв'язок між об'ємом виливу та висотою дамби хвостосховища

Висновки. Ретроспективний огляд та статистичний аналіз аварій на хвостосховищах показав наступне:

1. Пік аварійних ситуацій на хвостосховищах припав на 1960-2000рр., коли їхня кількість досягала близько 58 подій за десятиліття. У 2000-х роках спостерігалось зменшення кількості випадків, проте з 2010 року відбувається тенденція до їх зростання.

2. Північна Америка є континентом з найбільшою кількістю аварій на хвостосховищах (41%). Кількість аварій, що сталися, є високою в США, Чилі, Канаді, Китаї, Перу, Філіппінах, Бразилії та Великобританії.

3. Аналіз причин виникнення аварій на хвостосховищах показав, що основними факторами руйнувань є перелив води через гребінь дамби (21%), порушення стійкості дамби (16%) та сейсмічні впливи (15%).

4. Аварії переважно трапляються на дамбах хвостосховищ висотою до 30 м. На етапі проектування, будівництва та експлуатації хвостосховищ необхідно особливу увагу приділити саме низьким та середнім по висоті дамбам.

5. Об'єм заскладованих хвостів в хвостосховищі є важливим фактором, який впливає на масштаби при проривах огорожувальних споруд. Виявлено функціональні зв'язки між об'ємом хвостів, заскладованих в хвостосховищі, і об'ємом виливу хвостів при руйнуванні дамби.

6. Опрацювання статистичної інформації про основні пошкодження і руйнування дамб хвостосховищ дозволило виявити найбільш вразливі і найменш надійні елементи конструкцій огорожувальних споруд хвостосховищ, що дозволить застосувати їх при виконанні розрахунків щодо визначення імовірностей виникнення аварій на даних спорудах.

Література

1. Responsible Investor, 2019. How big is the mining sector tailings dam problem? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.responsible-investor.com/em-td/> (дата звернення 15.04.2024).

2. S. Azam. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years /S. Azam, Q. Li/ *Geotechnical News*. – 2010. – №28. – С.50–53.
3. ICOLD. Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121. – Paris, France: United Nations Environmental Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Commission on Large Dams (ICOLD). – 2001. – 144 с.
4. EPA. Damage Cases and Environmental Releases from Mines and Mineral Processing Sites. – Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 1997. – 275 с.
5. K. Islam. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020 /K. Islam, S. Murakami/ *Global Environmental Change*. – 2021. – №70:102361.
6. L. Piciullo. A new look at the statistics of tailings dam failures /L. Piciullo [та ін.]/ *Engineering Geology*. – 2022. – №303:106657.
7. L.N. Bowker. The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures. / L.N. Bowker, D.M. Chambers. – 2015.
8. C. Roche. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident – A Rapid Response Assessment / C. Roche, K. Thygesen, E. Baker. – Nairobi and Arendal, 2017.
9. M. Rico. Reported tailings dam failures / M. Rico [та ін.]/ *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – №152. – С. 846–852.
10. Z. Lyu. A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history / Z. Lyu [та ін.]/ *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – С. 1–18.
11. USCOLD. TDI. – Denver, CO, USA: US Committee on Large Dams. – 1994.
12. UNEP. Environmental and Safety Incidents Concerning Tailings Dams at Mines: Results of a Survey for the Years 1980–1996 by the Mining Journal Research Services. – Paris, Report Prepared for United Nations Environment Programme, Industry and Environment. – 1996.
13. WISE World Information Service on Energy Uranium Project. Chronology of Major Tailings Dam Failures. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (дата звернення 10.04.2024).
14. WMTF. World Mine Tailings Failures. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://worldminetailingsfailures.org> (дата звернення 15.04.2024).

References

- [1] Responsible Investor, 2019. How big is the mining sector tailings dam problem? [Online]. Available: <https://www.responsible-investor.com/em-td/>. Accessed on: April 15, 2024.
- [2] S. Azam and Q. Li, “Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years,” *Geotechnical News*, vol. 28, pp. 50–53, 2010.
- [3] ICOLD, “Tailings Dams—risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences,” United Nations Environmental Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, France, Bulletin 121, 2001.
- [4] EPA, *Damage Cases and Environmental Releases from Mines and Mineral Processing Sites*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington, DC, USA, 1997.
- [5] K. Islam and S. Murakami, “Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020,” *Global Environmental Change*, vol. 70, pp. 102361, 2021.
- [6] L. Piciullo, E.B. Storrost, Z. Liu, F. Nadim and S. Lacasse, “A new look at the statistics of tailings dam failures,” *Engineering Geology*, vol. 303, pp. 106657, 2022.
- [7] L.N. Bowker and D.M. Chambers, “The Risk, Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures,” 2022.
- [8] C. Roche, K. Thygesen, and E. Baker, “Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident – A Rapid Response Assessment,” *Nairobi and Arendal*, 2017.
- [9] M. Rico, G. Benito, A. R. Salgueiro, A. Driez-Herrero, and H. G. Pereira, “Reported tailings dam failures,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 2, pp. 846–852, 2008.

- [10] Z. Lyu, J. Chai, Z. Xu, Y. Qin and J. Cao, “A comprehensive review on reasons for tailings dam failures based on case history,” *Advances in Civil Engineering*, pp. 1–18, 2019.
- [11] USCOLD, TDI, *US Committee on Large Dams*, USCOLD, Denver, CO, USA, 1994.
- [12] UNEP, Environmental and Safety Incidents Concerning Tailings Dams at Mines: Results of a Survey for the Years 1980–1996 by the Mining Journal Research Services, *Report Prepared for United Nations Environment Programme, Industry and Environment*, Paris, 1996.
- [13] WISE, World Information Service on Energy Uranium Project, Chronology of Major Tailings Dam Failures. [Online]. Available: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Accessed on: April 10, 2024.
- [14] WMTF, World Mine Tailings Failures. [Online]. Available: <http://worldminetailingsfailures.org>. Accessed on: April 15, 2024.

UDK 627.514

TAILINGS DAM FAILURES: A STATISTICAL DATA ANALYSIS

Radchuk O.D., graduate student
oleksandr.radchuk@uvkp.com.ua, ORCID 0009-0007-7020-2192
SI “UKRRDIWATERCHANNELPROJECT”

Makhinko A.V., ScD, Professor
makhinko.anton@npp.nau.edu.ua, ORCID 0000-0002-9147-7087
National Aviation University

Minerals processing produces two main products: a commercial product (concentrate, pellets) and tailings (waste from ore processing). The tailings are stored in a tailings storage facility (TSF), a special hydraulic structure for receiving and storing solid and liquid mineral processing waste. The focus is primarily on ensuring the reliability and safety of these facilities during their design, construction, and operation, as a failure of such structures can have catastrophic consequences. This paper computes the statistics of tailings dam failures using an up-to-date database on failures. The retrospective review covers the period from 1915 to 2024. During this time, about 373 cases of tailings dam failures were recorded. The historical trend regarding the number of failures has an average of 3.42 failures per year. The majority of failures occurred between 1960 and 2000 (230 failures), accounting for approximately 62% of the total number of accidents. In the 2000s, a decrease in the number of incidents compared to previous decades was observed, while after 2010, there is a tendency for an increase in the number of incidents (5.9 failures per year). The accidents in tailings dam breakages occur mostly in North America (41%). Statistical data analysis shows that the main causes of failures are overtopping (21%), slope instability (16%) and seismic instability (15%). The analyses of the distribution of the world's tailings dam failures with regard to dam height show that 90% of the cases occurred in dams less than 50m in height and only 2% of incidents in dams higher than 100 m. The correlations between stored and released volumes have been verified using a database. Based on the relationship found from the regression analysis, as the tailings volume increases by 1%, the release volume increases by 0.25%. Statistical data analysis of tailings dam failures allowed for the identification of the most vulnerable and least reliable elements of the structures of TSF, which will allow them to be used in the probability analysis of accidents at these structures.

Keywords: tailing storage facility, failure, statistical analysis, correlation, regression.