

© Л.М. Рудаков¹

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ З РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ХВОСТОСХОВИЩА РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

© L. Rudakov¹

¹Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

JUSTIFICATION OF TECHNICAL MEASURES FOR THE REMEDIATION OF THE RADIOACTIVE WASTE TAILING POND

Мета. Обґрунтування технічних рішень з рекультивації хвостосховища для зменшення обсягів водонасичення радіоактивних відходів (РАВ). Мінімізувати інфільтраційні процеси надходження атмосферних вод, які призводять до зниження стійкості огорожувальних дамб та посилюють процеси міграції радіонуклідів у навколишнє середовище.

Методика дослідження. Застосовані ряд польових досліджень з використанням ГІС-технологій по вивченню рельєфу поверхні хвостосховища. Розрахунки обсягів земляних робіт по плануванню поверхні виконані за відомими геодезичними підходами шляхом нівелювання поверхні по квадратах. Використані методи математичної статистики до визначення розрахункових метеорологічних і гідрологічних характеристик, модулів та об'ємів стоку дощових паводків для проектування системи водовідведення.

Результати дослідження. Встановлено обсяги земляних робіт по рекультивації та переплануванню поверхні хвостосховища. Визначено максимальні об'єми стоку атмосферних вод та конструктивні параметри роботи водовідвідних каналів.

Наукова новизна. Запропоновано параметри змін елементів форми мезорельєфу поверхні хвостосховища, які базуються на гідрологічних особливостях формування поверхневого стоку в нових проектних умовах його експлуатації. Нові закономірності формування поверхні хвостосховища дозволяють у подальшому організовано відвести поверхневий стік без створення аварійних ситуацій. Запропоновано варіант удосконалення протифільтраційного захисту поверхні хвостосховища, який складається з декількох послідовних шарів покриття.

Практичне значення. Реалізація проектних рішень дозволить зменшити негативний вплив сховища РАВ на довкілля, шляхом зниження швидкості міграції радіонуклідів у поверхневі та підземні води. Підвищення стійкості та надійності роботи ґрунтових огорожувальних дамб.

Ключові слова: хвостосховище, радіоактивні відходи (РАВ), радіаційна безпека, рекультивація, протифільтраційні технічні заходи, поверхневий стік.

Вступ. Розвиток ядерної енергетики у світі в цілому та в Україні зокрема, призвів до значного накопичення радіоактивних хвостів збагачення уранових руд. На сьогодні такі хвостосховища становлять значну екологічну та радіаційну небезпеку для навколишнього середовища і людей [1]. Сучасне усвідомлення небезпеки спонукає науковців до пошуку нових стратегічних рішень щодо управління, експлуатації, рекультивації та реабілітації таких об'єктів [2]. Інвентаризація відходів збагачення уранового виробництва [3] засвідчує про накопичення

понад 2352 мільйонів тон в усьому світі (рис. 1), а кількість аварій на хвостосховищах з кожним роком збільшується, що призводить до негативних наслідків екологічного та соціально-економічного характеру [4].

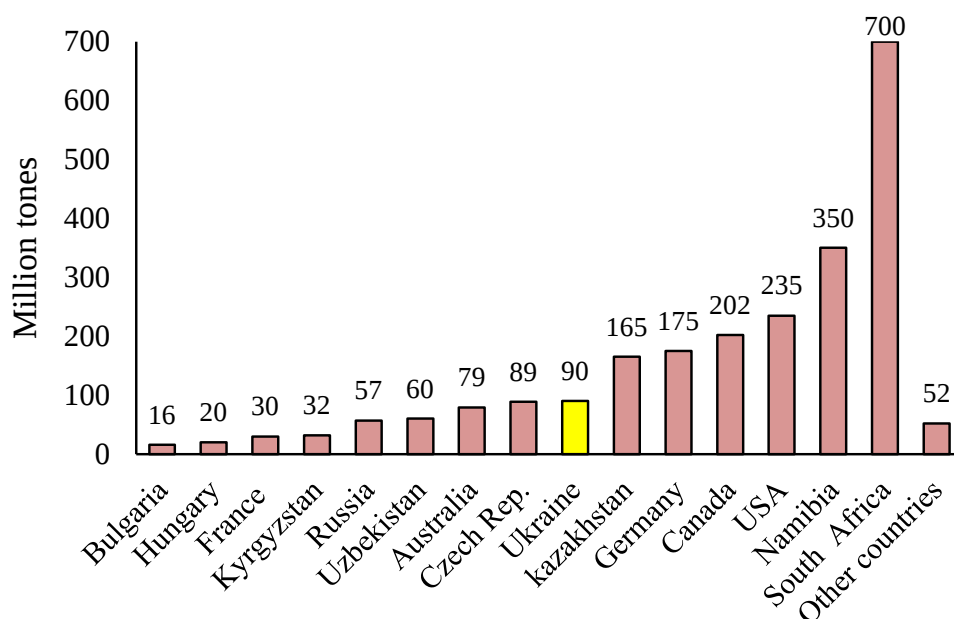


Рис. 1. Обсяги накопичення відходів уранового виробництва у різних країнах світу [3]

Основними чинниками, що впливають на підвищення рівня аварійності хвостосховищ є техногенні фактори впливу, кліматичні зміни [5, 6] і тривалі терміни експлуатації. Кліматичні чинники є причинами епізодичного понаднормового випадіння атмосферних опадів, що призводить до раптового підвищення рівня води у верхньому б'єфі хвостосховища, переливу води (хвостів) та водонасичення тіла огорожувальних дамб з подальшою втратою стійкості та руйнуванням. Таким чином, одним з ключових елементів безпеки хвостосховищ є надійність роботи огорожувальних споруд, систем відведення паводкових вод та дренажних пристроїв, що потребує постійного удосконалення за різних умов експлуатації та змін клімату.

Україна відноситься до однієї з країн світу, де повинна приділятися підвищена увага до хвостосховищ радіоактивних відходів (РАВ), як зі сторони держави так і міжнародного співтовариства (наприклад ІАЕА). У центральній частині України розташовані чисельні сховища РАВ, які були створені через високий попит на уран для військових цілей під час холодної війни без належного (у період будівництва середини ХХ сторіччя) розуміння радіаційної та екологічної небезпеки. Більшість таких об'єктів споруджувалися шляхом засипання ярів та балок з улаштуванням ґрунтових дамб обвалування. Недосконалість-технічних рішень та часткова відсутність водонепроникних протифільтраційних екранів в основі хвостосховищ та захисного покриття на їх поверхні, з плином часу посилює міграцію радіонуклідів із хвостів у ґрунти, підземні та поверхневі води, атмосферне повітря [7, 8]. Ризик існуючих радіоактивних хвостосховищ для

навколишнього середовища та людини посилюється невідповідністю між більш жорсткими сучасними вимогами до проектування та будівництва таких об'єктів у порівнянні із застарілими інженерними рішеннями, застосованими на стадії їх будівництва та введення в експлуатацію 50–80 років тому.

Найбільша кількість хвостосховищ РАВ знаходиться у м. Кам'янське (колишня назва – Дніпродзержинськ, Дніпропетровська область) де з 1948 по 1991 рр. переробляв уранові руди колишній Придніпровський хімічний завод (ПХЗ). Через це у 9 хвостосховищах на площі близько 270 га накопичено $42,4 \cdot 10^6$ тонн ($19,8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$) радіоактивних матеріалів. Одним із найбільших і найнебезпечніших місцевих хвостосховищ є «Дніпровське» («Д»), яке розташоване в заплаві р. Дніпро [9].

Спираючись на проведений аналітичний огляд та попередні роботи з оцінювання сучасного технічного стану хвостосховища «Дніпровське» (рівня його експлуатаційної та радіаційної безпеки) [10, 11] *актуальною метою* нашого дослідження є розробка проекту його рекультивації. При цьому ключовим елементом є мінімізації надходження атмосферних і талих вод, які інфільтруються через шар фосфогіпсу [12, 13] у хвості РАВ. Для досягнення мети досліджень необхідно вирішити ряд *задач* та передбачити: 1) зміну форм мезорельєфу покриття шляхом перепланування поверхні з постійним ухилом від центру хвостосховища до його периферії для забезпечення стоку води; 2) формування декількох шарів покриття, які за технічними параметрами дозволять забезпечити водонепроникність та мінімізувати радіаційне забруднення навколишнього середовища; 3) улаштування по периметру хвостосховища дренажних та ловчих каналів для організованого збору та відведення поверхневих вод.

Матеріали і методи. За даними [7, 11], хвості уранової руди захоронювалися в сховищі методом гідронамиву з 1954 по 1968 рр. Маса хвостів оцінюється приблизно в $12 \cdot 10^6$ тонн твердих радіоактивних матеріалів ($5,85 \cdot 10^6 \text{ м}^3$) загальною радіоактивністю $1,4 \cdot 10^{15}$ Бк. У період 1976–1980 рр. хвостосховище було покрите шаром фосфогіпсу потужністю від 1–5 м біля огорожувальних дамб та до 19 м у центральній і східній частинах. В даний період часу поверхня хвостосховища представляє собою безстічну територію – водозбір атмосферних опадів площею близько 76 га (рис. 2). У зв'язку з цим, практично вся вода активно фільтрується через водопроникний шар фосфогіпсу в радіоактивні відходи, що сприяє активному виносу радіонуклідів до підземних та поверхневих вод. Додатковим фактором прояву негативних геотехнічних процесів є формування ділянок суфозії, обводнення та зсуву на ґрунтовій огорожувальній дамбі.

За аналогією з попередніми дослідженнями [14, 15] на даному об'єкті були визначені ділянки підвищеної фільтрації із застосуванням геофізичних методів. У роботі [16] підтверджено негативний вплив даного об'єкту на поверхневі та підземні води внаслідок процесів міграції РАВ з фільтраційними водами. Підвищення рівня ґрунтових вод у чаші хвостосховища також негативно впливає на стійкість огорожувальних ґрунтових дамб. Розрахунки [17] показують негативну тенденцію до зниження стійкості захисних споруд. Таким чином, узагальнення попередніх досліджень дає можливість стверджувати та обґрунтувати, що

основною причиною підвищення рівня екологічної та радіаційної безпеки хвостосховища РАВ є обводнення внаслідок потрапляння значної кількості атмосферних опадів.

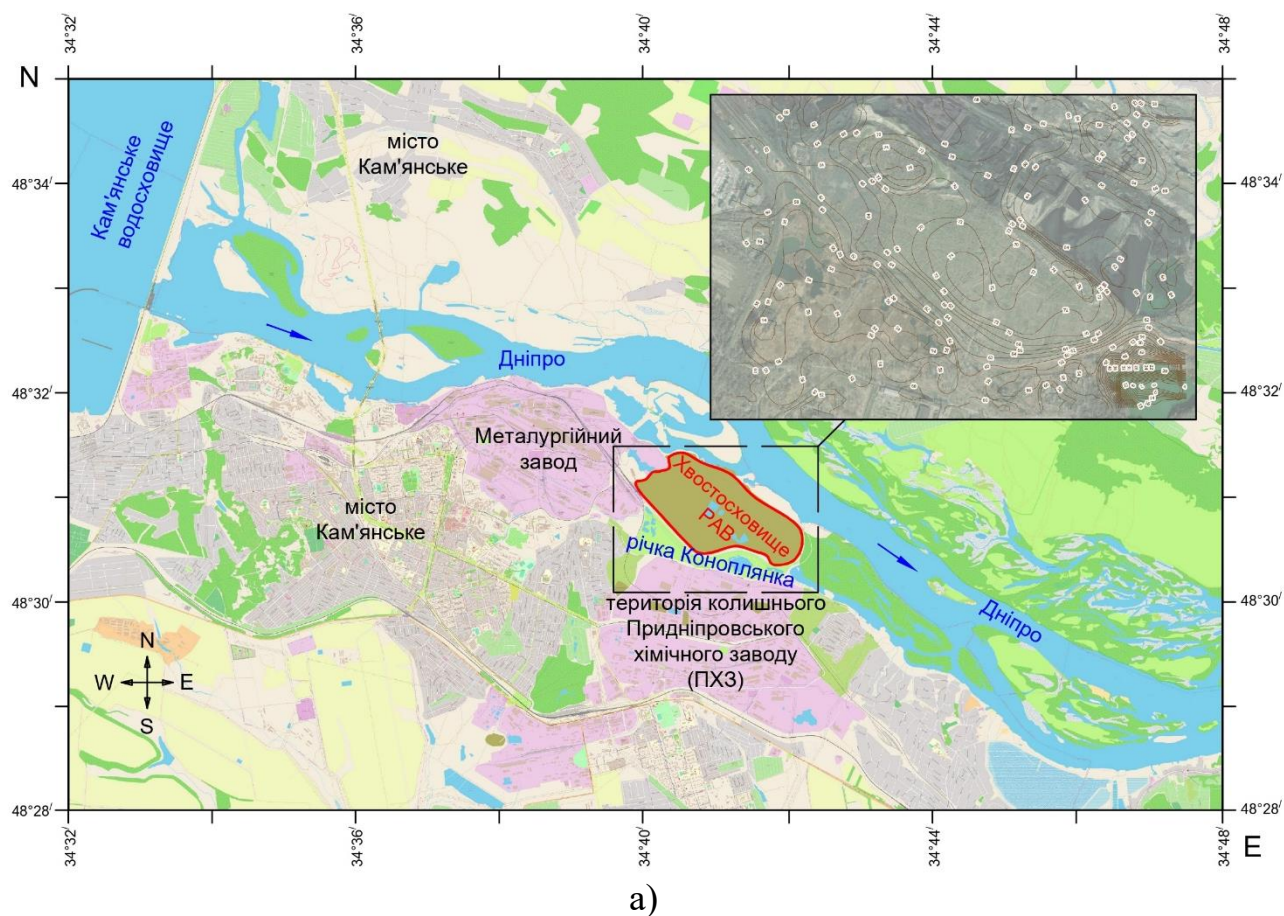


Рис. 2. Загальна характеристика об'єкту досліджень – хвостосховище «Дніпровське»: а) – оглядова карта та висотна характеристика території розташування; б) – фото загального вигляду поверхні хвостосховища (фосфогіпс)

Добре відомо, що при виборі місця розташування метеостанцій і організації їх роботи дотримувалися принципів репрезентативності і, густина мережі станцій (шт/км²) значно різняться по областям держави від 0,15–0,19 (Рівненська; Вінницька) до 0,46, 0,70 і 0,80 (Львівська, Закарпатська і АР Крим). Для Дніпропетровської області при 10 метеостанціях цей показник становить 0,31, як і для переважної кількості областей (в межах від 0,2 до 0,3), на місцевості це відстань в 20–30 км. Але звісно, що при виборі місця влаштування враховувались природні ландшафти, а ніяк не техногенні, до речі хвостосховища в той час ще не існували в тому вигляді як зараз. Тому звісно що визначити і провести оцінку кількості опадів безпосередньо на хвостосховищі або поблизу не є можливим. Аналіз даних метеостанцій Дніпропетровської області по атмосферним опадам за останнє двадцятиріччя (2004–2023 рр.) вказує, що опади шаром 50 мм і більше спостерігались від 2-х разів (метеостанції Кривий Ріг, Дніпро) до 6–7 разів (метеостанції Комісарівка, Синельникове, Чаплине). Ці дані зайвий раз підтверджують те явище, що великі зливові опади мають локальний і плямистий характер.

Дослідженнями умов формування дощових паводків встановлено, що модулі максимальних витрат зменшуються із зростанням площі водозбору. Ця обставина знайшла відображення в побудові редуційних формул. Основні параметри таких формул встановлюються за матеріалами спостережень по багатьох створах в різних районах [18–22].

Внаслідок відсутності на штучному покриві хвостосховища лісів, боліт і озер знижуючі коефіцієнти стоку з басейна в даному випадку дорівнюють 1, тобто не враховуються.

Розрахункові витрати дощових вод визначають за різними редуційними формулами і за формулою граничної інтенсивності стоку залежно від розмірів площі водозбору в різних природних зонах та висотних поясах, а також від наявності аналогів. В нормативному документі [23] для визначення максимального стоку з малих водозборів рекомендується формула граничної інтенсивності, яка застосовується в даних природно-кліматичних умовах при площах менше 50 км².

$$Q_{p\%} = H_{1\%} \varphi A_{1\%} \delta \lambda_{p\%} F, \quad (1)$$

де $H_{1\%}$ – максимальний добовий шар опадів 1%-ї забезпеченості, який визначається за даними найближчих до водозбору метеостанцій; φ – збірний коефіцієнт стоку; $A_{1\%}$ максимальний модуль стоку 1%-ї забезпеченості, виражений в частках від добутку $\varphi A_{1\%}$ при $\delta = 1$, прийнято згідно $\lambda_{p\%}$ – перехідний коефіцієнт від $P = 1\%$ до іншої розрахункової забезпеченості, що визначається за додатком [23].

Для розглянутих умов площа поверхні хвостосховища визначена за допомогою ресурсу Google Earth Pro дорівнює 0,9462 км² прийнятий максимальний добовий шар опадів в 50 мм, збірний коефіцієнт стоку II категорії штучно-насипаної поверхні при площі водозбору 0,1–1,0 км² прийнято рівним 0,7. Значення максимального модуля стоку 1%-ї забезпеченості визначено за додатком 21 для 5 району згідно карти Додатка 22 $A_{1\%} = 0,47 \text{ м}^3/(\text{с км}^2)$. Значення перехідних коефіцієнтів згідно Додатку 20 [23] прийняті $\lambda_{5\%} = 0,42$ і $\lambda_{10\%} = 0,30$.

Результати розрахунків максимальних витрат заданої забезпеченості зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Максимальні витрати заданої забезпеченості

$P, \%$	1	5	10
$\lambda_{p\%}$	1,00	0,42	0,30
$Q_{p\%}, \text{м}^3/\text{с}$	15,6	6,54	4,67
$q, \text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$	16,5	6,91	4,94

Реалізація поставлених завдань дослідження проводилась у декілька етапів. На першому етапі нами виконані дослідження сучасних форм рельєфу території шляхом візуальних оглядів чаші хвостосховища та ознайомлення з технічними звітами ДП «Бар'єр». З метою графічного представлення поверхні додатково застосовані геоінформаційні системи з відкритим кодом (доступом) Surfer, QGIS та Google Earth.

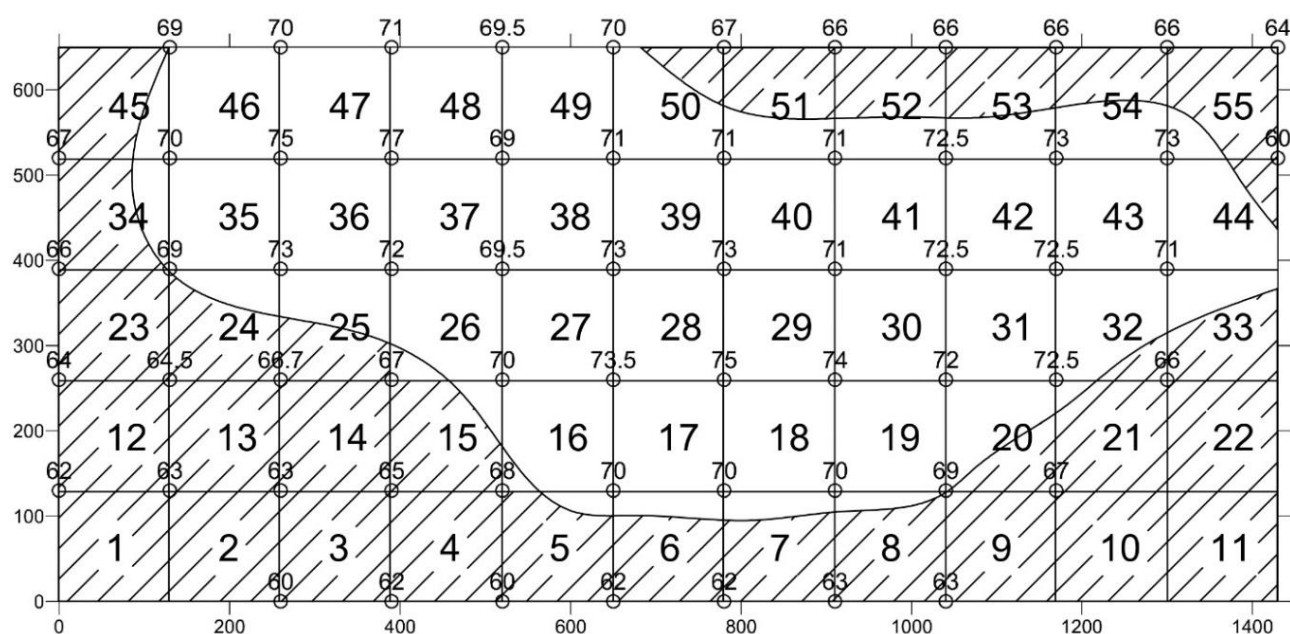


Рис. 3. Графічна схема сітки квадратів для розрахунків обсягів земляних робіт по рекультивації хвостосховища: 1-55 – номери квадратів; підписи у точках вершин квадратів – висотна відмітка поверхні, м; штриховка – насип; пусті квадрати – виїмка)

Вирівнювання поверхні та забезпечення мінімально необхідних ухилів для стоку води запропоновано виконати від центральної частини до захисних огорожувальних ґрунтових дамб по периметру хвостосховища. Реалізація таких інженерно-технічних заходів у наближеному варіанті розрахунку обсягів земляних робіт можлива шляхом застосування методики нівелювання по квадратах. Для цього план ділянки хвостосховища розбивають сіткою квадратів (для зручності розрахунку вершинами квадратів прийняті висотні точки побудови

топографічної карти рельєфу хвостосховища) та визначають висотну відмітку лінії нульових робіт. Запропонована сітка розбивається умовно на літерне та цифрове позначення вершин точок квадратів. Всього для розрахунку за даних умов ми використати 55 квадратів (див. рис. 3).

У загальному вигляді розрахунок висотної відмітки лінії нульових робіт за умови збереження балансу ґрунтових мас (об'єм ґрунту виїмки дорівнює об'єму насипу) наступний:

$$H_o = \frac{\sum h_1 + 2\sum h_2 + 3\sum h_3 + 4\sum h_4}{4n}, \quad (2)$$

де $\sum h_1$ – сума висотних відміток квадратів з однією вершиною; $2\sum h_2$ – подвійна сума висотних відміток квадратів з двома вершинами; $3\sum h_3$ – потрійна сума висотних відміток квадратів з трьома вершинами; $4\sum h_4$ – сума висотних відміток квадратів з чотирма вершинами помножена на чотири; n – кількість квадратів.

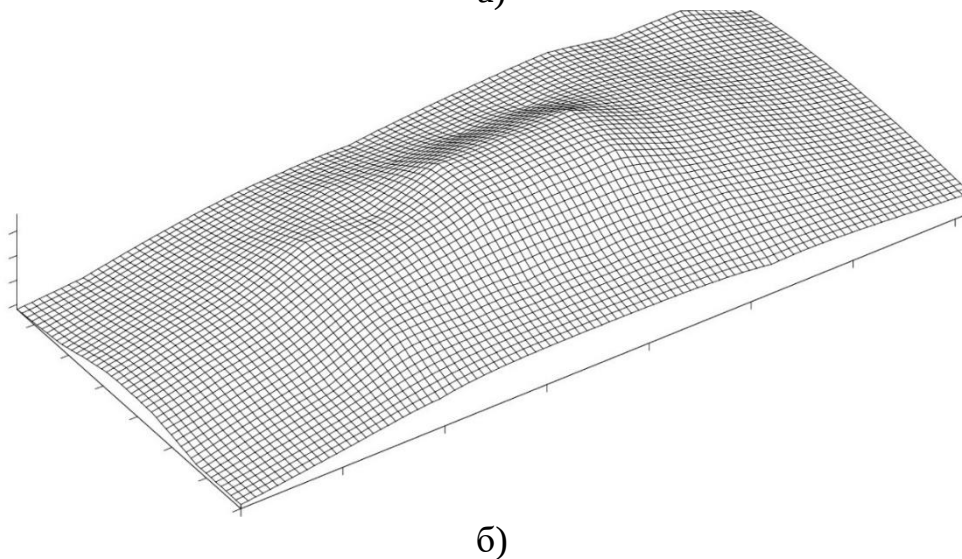
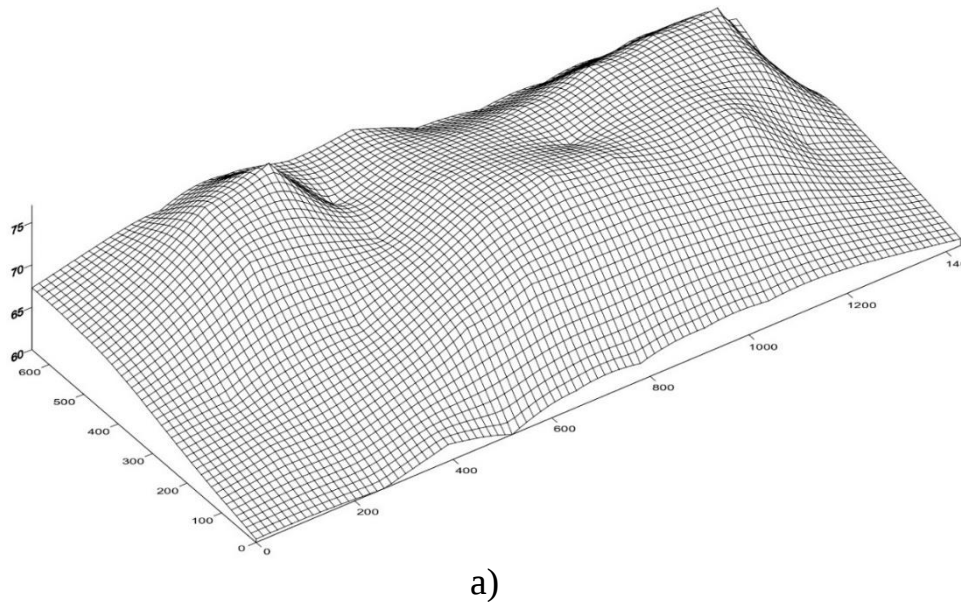


Рис. 4. Об'ємна модель (3D) сучасного рельєфу поверхні хвостосховища (а) та після спланування (б)

Після завершення планувальних робіт (див. рис. 4) проектом передбачається формування зосереджених ділянок стоку поверхневих (атмосферні опади) вод. У центральній частині хвостосховища буде розташований водорозділ, який умовно поділяє всю поверхню на чотири окремих ділянки водозбору (рис. 5).

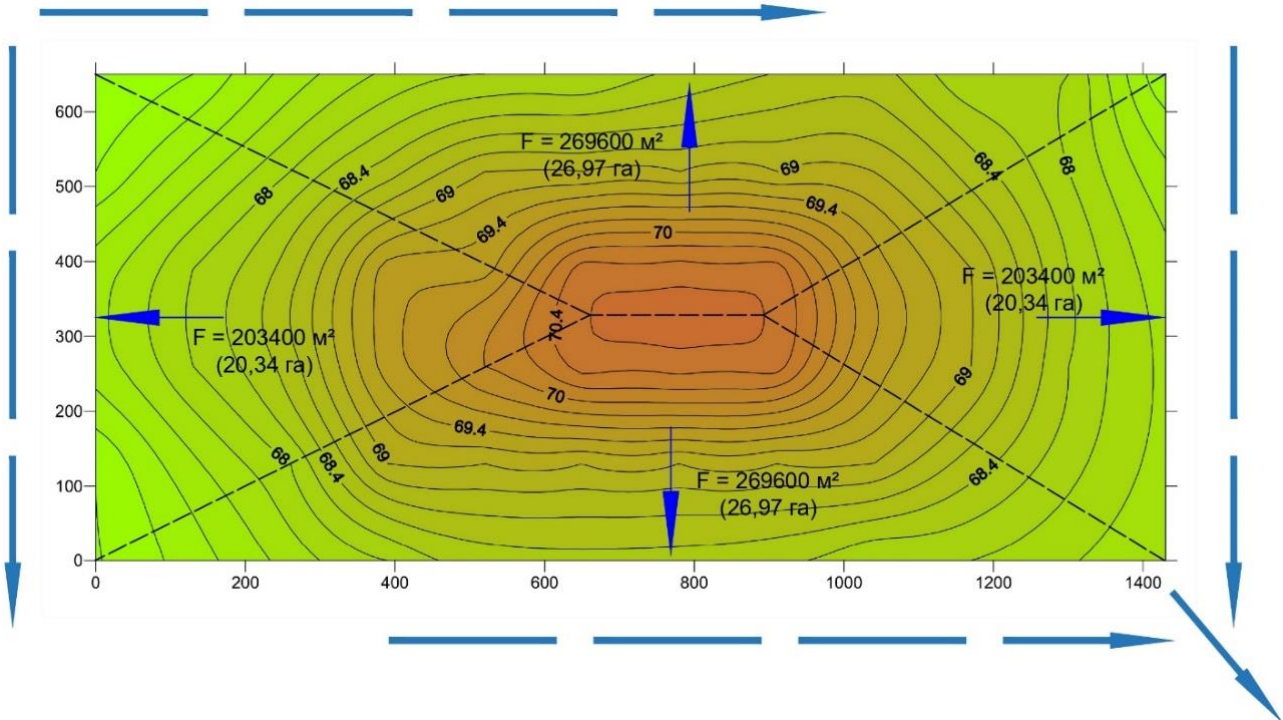
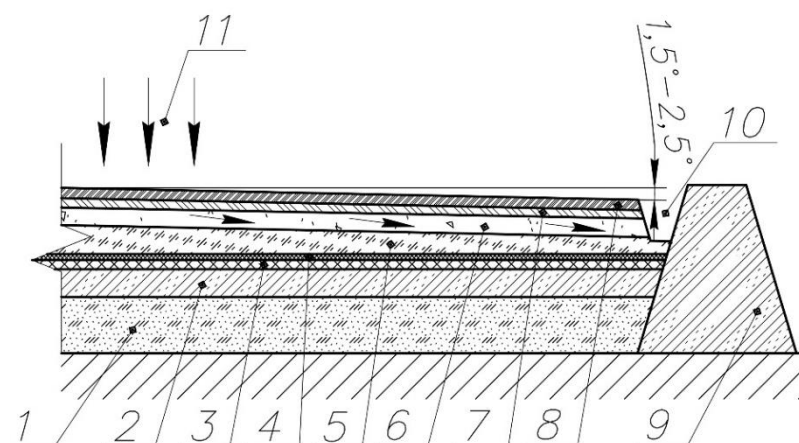


Рис. 5. Формування водозбірних ділянок на поверхні хвостосховища (стрілками вказаний напрямок потоку водовідведення)

Загальна територія проектних робіт становить 94,6 га. Отже, площа двох більших (поздовжніх) ділянок складатиме по 26,96 га кожної. Площі двох інших (поперечні ділянки) становлять по 20,34 га відповідно. При цьому планується облаштування двох основних ловчих каналів по периметру хвостосховища. Орієнтовна їх довжина становить близько 2100 м кожного.

Слід зазначити, що форма (конфігурація) водозбірних ділянок і відповідно об'єми земляних робіт можуть бути змінені, і як наслідок кошторисна вартість виконання земляних робіт буде іншою. Порівняння декількох варіантів форм та техніко-економічних розрахунків дозволить вибрати оптимальний і реалізувати його в межах виділених інвестицій для даного об'єкту.

Одним з основних завдань, що вирішується у даній роботі, є також формування надійного протифільтраційного покриття на поверхні сховища РАВ. Цей результат може бути досягнений шляхом пошарового улаштування гідроізоляційного матеріалу, наприклад, радіаційно стійкої гуми [18] з подальшим насипом водонепроникних, дренажних та родючих шарів з різного матеріалу відсіпки. Досвід подібної рекультиватії інших хвостосховищ [19, 20] надає можливість обґрунтувати нові технічні рішення саме для нашого досліджуваного об'єкту (рис. 6).



- 1 – РАВ,
- 2 – спланований шар фосфогіпсу,
- 3 – гідроізоляційний шар,
- 4 – геотекстиль,
- 5 – глина,
- 6 – піщано-гравійний дренаж,
- 7 – суглинок,
- 8 – родючий ґрунт,
- 9 – захисна дамба обвалування,
- 10 – ловчий канал,
- 11 – атмосферні опади та тала вода.

Рис. 6. Проектна схема улаштування протифільтраційного покриття хвостосховища РАВ «Дніпровське»

Реалізацію запропонованого способу запропоновано здійснювати наступним чином. По периметру хвостосховища виконують вирівнювання поверхні (з наявного матеріалу, який виступає як покриття від вітрової ерозії – фосфогіпс) та облаштовують гідроізоляційний шар з радіаційно стійкого матеріалу товщиною 1–2 мм. На його поверхню пошарово насипають та ущільнюють водонепроникний шар глини загальною товщиною 0,3–0,5 м, кут нахилу протифільтраційного покриття формують від центру хвостосховища до дамб (дамби) обвалування в межах 1,5–2,50 для самопливного відводу атмосферних і талих вод. Над водонепроникним шаром додатково формують і ущільнюють піщано-гравійний дренаж товщиною 0,3–0,4 м. Далі поступово насипається і ущільнюється шар суглинку товщиною 0,2–0,3 м, а його поверхня покривається родючим ґрунтом (чорнозем або інший гуміфікований ґрунт) товщиною 0,15–0,2 м та засівається багаторічними травами з потужною кореневою системою. По периметру облаштованого захисного шару хвостосховища облаштовуються дренажні та ловчі канали, які виконують функцію організованого збору та відведення води. Застосування запропонованого способу рекультивації хвостосховищ відходів уранопереробних виробництв дозволить підвищити якість захисту протифільтраційного покриття та знизити їх техногенний вплив на навколишнє природне середовище. Для подальшого техніко-економічного розрахунку та визначення кошторисної вартості проекту, загальний перелік всіх видів та об'ємів робіт зведений у результуючу відомість (табл. 2).

За результатами проведених техніко-економічних розрахунків (програмний комплекс з автоматизованого виконання кошторисів) отримано, що загальна кошторисна вартість проекту з рекультивації хвостосховища РАВ складає близько 550-600 млн. грн. У зв'язку зі значною дорожнечою проекту, покриття даних витрат та фінансування такого проекту з державного чи місцевого бюджету за

нинішніх умов може бути малоімовірним. З метою отримання фінінсування, перспективним є залучення закордонних міжнародних організацій (наприклад – МАГАТЕ). У перерахунку на іноземні валюти при курсі 1 \$ (US) – 38 грн. (UA) витрати становитимуть 14,5–16 млн. доларів США.

Таблиця 2

Зведена відомість земляних та будівельно-монтажних робіт

№	Види робіт	Одиниця вимірювання	Показник (об'єм робіт)
1	Корчування чагарників та невеликих дерев на поверхні хвостосховища	га	28,2
2	Розробка фосфогіпсу з переміщенням рекультивованої маси з місця виїмки до ділянок насипу	м ³	1435200
3	Планування поверхні хвостосховища	м ²	946000
4	Улаштування гідроізоляційного матеріалу з радіаційно стійкої гуми (плівки) на спланованій поверхні	м ²	993000
5	Улаштування геотекстилю (крани, монтажники)	м ²	993000
6	Формування протифільтраційного шару з глини	м ³ / м ²	378400 / 946000
7	Формування дренажного шару з піщано-гравійної суміші	м ³ / м ²	283800 / 946000
8	Відсипка суглинковим ґрунтом	м ³ / м ²	189200 / 946000
9	Покриття хвостосховища родючим шаром ґрунту	м ³ / м ²	141900 / 946000
10	Розробка траншей для монтажу ловчих каналів	м ³	6300
11	Улаштування піщано-гравійної суміші в основі ловчих каналів	м ³	420
12	Монтаж ловчих каналів із залізобетонних лотків	м	4200
13	Висів багаторічних трав на поверхні хвостосховища	га	94,6

Завдяки співпраці з організацією (Державне підприємство «Бар'єр»), яка займається обслуговуванням досліджуваного об'єкту [21] та можливістю ознайомитись з попередніми звітами, ми маємо змогу порівняти деякі проектні варіанти рекультивації хвостосховища. Так, наприклад, були запропоновані наступні технічні рішення: 1) виконання протифільтраційної завіси в тілі гідротехнічної споруди (ґрунтової дамби); 2) планування поверхні із формуванням захисного екрану з глинистих ґрунтів.

Перший проект відзначається своєю дорожнечою (за нинішніх цінових умов – понад 80 млн. доларів США), складністю технічної реалізації й тривалістю виробництва робіт – 4–5 років. Небезпечним з точки зору надійності та цілісності конструкції огорожувальної дамби є процес буріння значної кількості свердловин та нагнітання протифільтраційного розчину. Крім цього, такий варіант зменшення фільтраційної міграції РАВ не вирішує проблему їх постійного обводнення внаслідок живлення атмосферними водами.

Другий варіант є аналогом проектних рішень запропонованих у даному дослідженні. Його орієнтовна вартість оцінюється у близько 22 млн. доларів США. Він полягає в улаштуванні площинного тампонажу, що включає планування поверхні хвостосховища, укладку шару щебню потужністю 0,2 м і покриттям його глино-цементно-силікатним матеріалом методом вільного наміву.

Крім запропонованих способів рекультивації поверхні Дніпровського хвостосховища можливе біологічне закріплення поверхні захисного шару цього небезпечного об'єкту за допомогою висадки різних рослин і перепрофілювання поверхні [24–26].

Висновки. Проаналізовані результати попередніх досліджень вивчення технічного стану поверхні покриття хвостосховища, стійкості захисних огорожувальних дамб, визначенні ділянок їх обводнення та водонасичення, а також фільтраційної міграції РАВ. Визначено, що однією з основних причин низького рівня радіаційної та екологічної безпеки хвостосховища є процес надмірного насичення РАВ атмосферними водами. Це викликано змінами кліматичних умов, що обґрунтовує формування паводків внаслідок дощів зливового характеру, а шар фосфогіпсу, який вкриває хвостосховище, активно інфільтрує воду до РАВ.

Запропоновано та обґрунтовано технічний проект з рекультивації поверхневого захисного покриття хвостосховища. Рівномірність планування поверхні та удосконалення пошарової відсіпки протифільтраційного покриття надає змогу знизити обсяги потрапляння атмосферної води у процесі інфільтрації до хвостів РАВ.

Гідрологічними розрахунками обґрунтовані параметри максимальних витрат весняних повеней і дощових паводків. Це дозволяє запропонувати конструктивні рішення до улаштування водозбірних каналів і організованого відведення води по периметру хвостосховища.

Порівняння кошторисної вартості запропонованого проекту з попередніми дослідженнями засвідчують про доцільність його впровадження. Загальна оціночна вартість робіт з рекультивації сягає близько 14,5–16 млн доларів США, що є достатньо прийнятним показником з огляду на небезпечність даного об'єкту, підвищену увагу зі сторони держави та міжнародних організацій. Перспективою у реалізації запропонованих технічних рішень з рекультивації хвостосховища «Дніпровське» та підвищення рівня його радіаційної безпеки є залучення міжнародних інвестицій (наприклад – МАГАТЕ).

Подяка. Автор вдячний державному підприємству «Бар'єр» за можливість доступу до об'єкта та роботи зі звітами попередніх досліджень.

Перелік посилань

1. Ayoub, A. AT., Song, Y., & Sagiroun, M. IA. (2024). Radiological Hazard Assessment for human from Nuclear Power Plant effluent released under normal operation scenario (hypothetical case study). *Radiation Physics and Chemistry*, 216, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111380>
2. Williams, D. J. (2021). Lessons from tailings dam failures—where to go from here? *Minerals*, 11(8), 853. <https://doi.org/10.3390/min11080853>
3. World Information Service on Energy (2024). Chronology of major tailings dam failure. <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
4. Lindborg, T., Thorne, M., Andersson, E., Becker, J., Brandefelt, J., Cabianca, T., Gunia, M., Ikonen, A. T. K., Johansson, E., Kangasniemi, V., Kautsky, U., Kirchner, G., Klos, R., Kowe, R., Kontula, A., Kupiainen, P., Lahdenperä, A.-M., Lord, N. S., Lunt, D. J., ... Pröhl, G. (2018). Climate change and landscape development in post-closure safety assessment of Solid Radioactive Waste Disposal: Results of an initiative of the IAEA. *Journal of Environmental Radioactivity*, 183, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.006>
5. Williams, D. (2008). The influence of climate on seepage from mine waste storages during deposition and post-closure. *Proceedings of the International Conference on Mine Closure*. https://doi.org/10.36487/acg_repo/852_42
6. Labonté-Raymond, P.-L., Pabst, T., Bussière, B., & Bresson, É. (2020). Impact of climate change on extreme rainfall events and surface water management at Mine Waste Storage Facilities. *Journal of Hydrology*, 590, 125383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125383>
7. IAEA (2006). *Radiological conditions in the Dnieper River basin: Assessment by an international expert team and recommendations for an action plan*. International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1230_web.pdf
8. Chetveryk, M., Bubnova, O., Babii, K., Shevchenko, O., & Moldabaev, S. (2018). Review of geomechanical problems of accumulation and reduction of mining industry wastes, and ways of their solution. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 63–72. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.063>
9. Rudakov, L. (2023). Environmental safety level assessment of radioactive waste tailings storage facilities using checklists. *Ecological Sciences*, 2(47), 107–111. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.17>
10. Tymoshchuk, V., Tishkov, V., & Soroka, Y. (2018). Hydro and geomechanical stability assessment of the bund wall bottom slope of the Dniprovsk tailing dump. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 39–47. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.039>
11. Korovin, V. Yu., Valiaiev, O. M., Pohorielov, Yu. M., Shestak, Yu. G., Lavrova, T. V., & Haneklaus, N. (2021). Uranium sorption from radioactive waste of uranium ore processing at Pridneprovsk Chemical Plant. *Geo-Technical Mechanics*, 157, 212–222. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.157.212>
12. Yelatontsev, D. (2023). Utilization of phosphogypsum in phenol removal from coking wastewater. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 4, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2023.100089>
13. Pikarenia, D., Orlinska, O., Hapich, H., Rudakov, L., Chushkina, I., & Mazurenko, R. (2024). Utilization of phosphogypsum from industrial dumps as an element of environmentally safe energy- and resource-conserving technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012053>
14. Tkachenko, Y. (2020). *The Prydniprovsky Chemical Plant—Ukraine's Uranium Heritage*. Bellona Foundation. <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2020/11/Pridniprovsky-Chemical-plant-English.pdf>
15. Hapich, H., Pikarenia, D., Orlinska, O., Kovalenko, V., Rudakov, L., Chushkina, I., Maksymova, N., Makarova, T., & Katsevyh, V. (2022). Improving the system of technical diagnostics and environmentally safe operation of soil hydraulic structures on small rivers. *Eastern-European*

- Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (116)), 18–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255167>
16. Rudakov, D., Pikarenia, D., Orlinska, O., Rudakov, L., & Hapich, H. (2023). A predictive assessment of the uranium ore tailings impact on surface water contamination: Case study of the City of Kamianske, Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 268–269, 107246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107246>
 17. Tymoshchuk, V., Rudakov, L., Pikarenia, D., Orlinska, O., & Hapich, H. (2023). Analyzing stability of protective structures as the elements of geotechnical tailing pond safety. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 116–122. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.116>
 18. Dyrda, V., Lapin, V., Lysytsia, M., Puhach, A., Bulat, Ie., Pankevych, I., Ahaltsov, H., Slobodian, S., & Kalhankov, Ye. (2022). Some problems of the new radiation-resistant rubber mechanics in vibrating machines at hard γ -radiation. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 970, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012017>
 19. Sawatsky, L. F., Cooper, D. L., McRoberts, E., & Ferguson, H. (1996). Strategies for reclamation of tailings impoundments. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 10(3), 131–134. <https://doi.org/10.1080/09208119608964816>
 20. Cacciuttolo, C., Pastor, A., Valderrama, P., & Atencio, E. (2023). Process Water Management and seepage control in tailings storage facilities: Engineered Environmental Solutions applied in Chile and Peru. *Water*, 15(1), 196. <https://doi.org/10.3390/w15010196>
 21. Barrier State Enterprise (2024). *Enterprise objects*. <https://web.archive.org/web/20140527140539/http://baryer.dp.ua/index.php/activity-of-enterprise/objects-enterprise/>
 22. Lytovchenko, O.F. (1999). *Engineering hydrology and flow regulation*. Higher school.
 23. SNiP 2.01.14-83 Determination of calculated hydrological characteristics. (1983). https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=4260
 24. *Method of biological consolidation of the tailings surface* (2024). (patent 156998 Ukraine: E21C41/00. № u202401031 ; applied on 27.02.2024 ; published on 28.08.2024, Bulletin no № 35/2024. 4 p.)
 25. *Method of tailings reclamation* (2024). (patent 156999 Ukraine : E21C41/32 E21F15/00. №. u202401033 ; applied on 27.02.2024 ; published on 28.08.2024, Bulletin no. № 35/2024. 4 p.)
 26. *Method of tailings reclamation* (2024). (patent 156936 Ukraine : E21C41/32 E21F15/00. №. u202401010 ; applied on 27.02.2024 ; published on 21.08.2024, Bulletin no. № 34/2024. 5 p.)

ABSTRACT

Purpose. To substantiate technical solutions for tailing pond remediation to reduce the volume of water saturation of radioactive waste. To minimize the infiltration processes of atmospheric water inflow, which lead to a decrease in the stability of the containment dams and enhance the processes of radionuclide migration into the environment.

Research methods. A number of field studies were conducted using GIS technologies to study the tailing pond surface topography. Calculations of the volume of earthworks for surface planning were performed according to well-known geodetic approaches by leveling the surface by squares. Methods of mathematical statistics were used to determine the estimated meteorological and hydrological characteristics, modules and volumes of rainfall runoff for the design of the drainage system.

Results of the study. The scope of earthworks for the reclamation and redevelopment of the tailing pond surface was determined. The maximum volumes of atmospheric water runoff and the design parameters of the drainage channels were determined.

Scientific novelty. The parameters of changes in the elements of the mesorelief of the tailing dump surface based on the hydrological features of the formation of surface runoff under the new design conditions of its operation are proposed. The new patterns of tailing dump surface formation will

allow for further organised drainage of surface runoff without creating emergency situations. A variant of improving the impervious surface protection of the tailing dump, consisting of several consecutive layers of coating, is proposed.

Practical significance. Implementation of the design solutions will reduce the negative impact of the radioactive waste storage facility on the environment by reducing the rate of radionuclide migration to surface and groundwater. Increasing the stability and reliability of the soil containment dams.

Keywords: *tailing pond, radioactive waste (RW), radiation safety, remediation, anti-filtration technical measures, surface runoff.*