

© В.І. Тимошук¹, Є.В. Тимошук¹, Д.С. Сінкевич¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ХВОСТОСХОВИЩА ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ДІЛЯНКИ ПРОЕКТОВАНОГО БУДІВНИЦТВА

© V. Tymoshchuk¹, Y. Tymoshchuk¹, D. Sinkevych¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

HYDRODYNAMIC REGIME MODELING OF THE TAILING DUMP TO JUSTIFY THE SELECTION OF THE PROPOSED CONSTRUCTION SITE

Метою роботи є прогнозна оцінка гідродинамічного режиму проектного хвостосховища в умовах Східно-Валявкинського залізорудного родовища для обґрунтування вибору ділянки його будівництва.

Методика дослідження. Для прогнозу гідродинамічного режиму та оцінки фільтраційних втрат із хвостосховища використана реалізована у програмному комплексі Visual MODFLOW чисельна модель геофільтрації, яка представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної щільності в пористому середовищі. Методикою прогнозу передбачалось виконання комплексу фільтраційних та водно-балансових розрахунків з порівняльною оцінкою змін гідродинамічного режиму ділянки будівництва для варіантів розміщення проектного хвостосховища.

Результати дослідження. Методом математичного моделювання розроблений прогноз змін гідродинамічного режиму підземних вод на ділянці будівництва та виконана оцінка фільтраційних втрат із проектного хвостосховища для варіантів його розташування. На основі аналізу балансових складових чисельної моделі визначений характер живлення і розвантаження підземних вод та встановлені параметри їх гідродинамічного зв'язку з поверхневими водами. За результатами моделювання обґрунтований вибір гідродинамічно доцільного варіанта розташування хвостосховища та визначені заходи щодо зниження фільтраційних втрат.

Новизна. У роботі за результатами математичного моделювання встановлена залежність гідродинамічного режиму проектного хвостосховища від умов живлення-розвантаження підземних вод на ділянці будівництва, їх зв'язку з режимом акумульованих поверхневих вод в межах існуючих гідротехнічних споруд та особливостей геолого-гідрогеологічної будови досліджуваної території відповідно до варіантів розташування гідротехнічної споруди.

Практичне значення результатів. Представлені в роботі результати моделювання та виконані оцінки можуть бути використані для обґрунтування проектів будівництва гідротехнічних споруд в складних геолого-гідрогеологічних умовах.

Ключові слова: хвостосховище, гідродинамічний режим, геофільтраційна модель, математичне моделювання.

Вступ. В сучасних умовах обґрунтування проектів будівництва базується на використанні визначеного комплексу гідрогеологічних та інженерно-геологічних досліджень, які дозволяють отримувати вихідну інформацію для характеристики умов проектного будівництва, виконувати оцінку стану геологічного

середовища в межах території проектного будівництва та його змін під впливом будівництва і експлуатації будівель і споруд, виробничих підприємств і гірничо-видобувних комплексів. на різних стадіях проектування – від техніко-економічного обґрунтування до розробки технічних проектів та робочої документації різних видів будівництва.

Складність і багатфакторна обумовленість процесів, що відбуваються в умовах взаємодії інженерних споруд і геологічного середовища, вимагають застосування сучасних методів досліджень, до яких відносяться і методи моделювання гідродинамічних процесів. Локальні і регіональні прогнози із застосуванням сучасних методів математичного моделювання складають основу для розробки технічних рішень та інженерних заходів, спрямованих на забезпечення геотехнічної стійкості і техногенної безпеки об'єктів будівництва [1–3].

Особливу важливість такі дослідження мають при обґрунтуванні вибору ділянок будівництва гідротехнічних споруд, до яких відносяться об'єкти хвостового господарства збагачувальних підприємств – хвостосховища.

Основна частина. Метою роботи є прогнозна оцінка гідродинамічного режиму проектного хвостосховища в умовах Східно-Валявкинського залізорудного родовища для обґрунтування вибору ділянки його будівництва.

Територія, яка відведена під промисловий майданчик, а саме хвостове господарство, розташована на колишній території Криворізького гірничо-збагачувального комбінату окислених руд (КГЗКОР).

За документацією проектних організацій було запроектовано два хвостосховища для складування хвостів гірничо-збагачувального комбінату: хвостосховище відходів магнітного збагачення і хвостосховище відходів флотаційного збагачення. В тому числі, для експлуатації даних споруд та зменшення впливу на довкілля було запроектовано ряд споруд інженерного гідрозахисту, системи гідротранспорту хвостів, оборотного водопостачання, тощо.

Споруди хвостового господарства та оборотного водопостачання розміщені у балці Криничуватській Долинського району. Ємності для складування відходів флотаційного та магнітного збагачення утворені двома ґрунтовими греблями. Під хвостове господарство було відведено у постійне користування 1245,7 га землі. Територія хвостосховища розташована у заплавах 4-х балок: Жданівської, Криничуватської, Ленінської та Безіменної. Основна гребля хвостосховища магнітного збагачення, як і усе хвостосховище, знаходиться у зоні тектонічного Ісаєвського розлому у земній корі. Розлом розташований вздовж Криничуватської балки, яка є основною ємністю хвостосховища і яку перетинає основна дамба хвостосховища. Нижня частина балки просувається на південний захід в напрямку р. Березівка.

Станом на 2022 р. ложе хвостосховищ частково затоплене водою, де накопичено 10,76 млн води. Рівень води в аварійній ємності (перед дамбою відвершку № 4) складає 129,10 м, згідно даних інженерних вишукувань.

Рівень води перед дамбою відвершку хвостосховища магнітного збагачення складає 118,51 м (рис. 1).

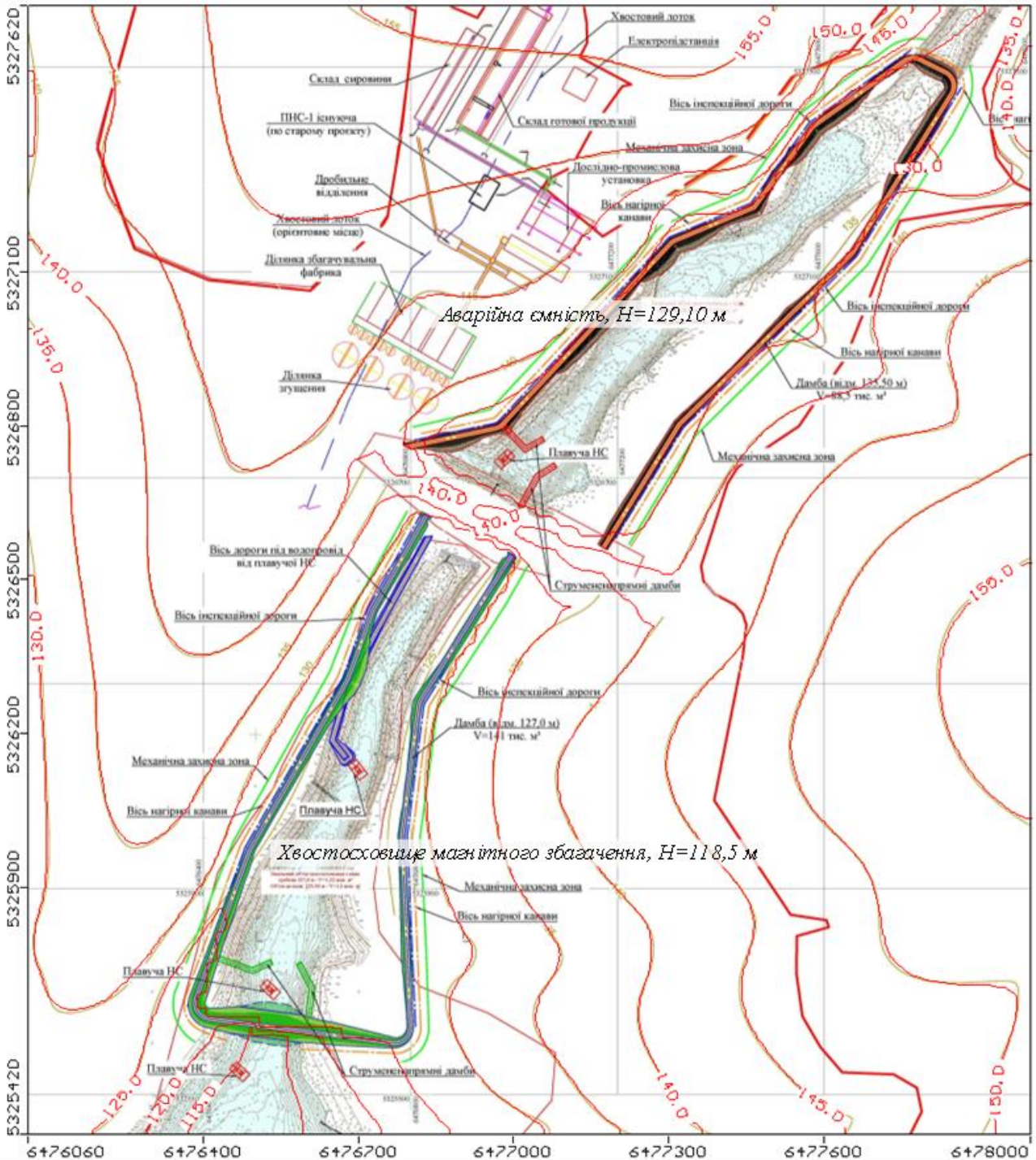


Рис. 1. Територія розташування проектного хвостосховища

До особливостей гідрогеологічних умов досліджуваної території слід віднести обмежене розповсюдження четвертинного водоносного горизонту, а також наявність гідрогеологічних «вікон» на ділянках розмиву червоно-бурих глин в тальвегах балок, що сприяє перетіканню підземних вод з четвертинного водоносного горизонту до водоносного горизонту неогенових відкладень.

Для оцінки гідродинамічного режиму території розташування проектного хвостосховища і прогнозу його змін під впливом фільтраційних втрат використана реалізована у програмному комплексі Visual MODFLOW чисельна

модель геофільтрації, яка представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної щільності в пористому середовищі [4–6].

При виконанні геофільтраційних розрахунків модельована область визначалась проектними положеннями хвостосховища за варіантами його розташування:

– хвостосховище за варіантом № 1 – відсік, який розміщується на майданчику раніше відведеного під аварійну ємність, розташований в балці на схід від дослідно-промислової установки;

– хвостосховище за варіантом № 2 – відсік, який розміщується в північній ділянці майданчика хвостосховища магнітного збагачення.

Розміри геофільтраційної моделі з урахуванням очікуваного впливу проектного хвостосховища відповідно до варіантів його розміщення визначені в прямокутних координатах 6476060...6478000 м в широтному напрямку і 5325420...5327620 м – в меридіональному, загальна площа модельованої області – 4,268 км².

В процесі підготовки моделі досліджувана територія дискретизована розрахунковими блоками 20 x 20 м, що дозволило з достатньою точністю відобразити конфігурацію існуючих гідротехнічних споруд і проектного хвостосховища, а також контури зовнішніх гідродинамічних границь в плані (рис. 2).

Структура чисельної моделі у відповідності до геолого-гідрогеологічної будови території будівництва представлена семишаровою товщею, що моделює верхню частину розрізу четвертинних відкладень, техногенні масиви хвостосховищ і огорожувальних споруд ($th-Q$) – розрахунковий шар 1, четвертинні відкладення і водотривкий шар суглинків (протифільтраційний екран) в основі хвостосховища ($th-Q$) – розрахунковий шар 2, водоносний горизонт четвертинних лесових відкладень (Q_{I-IV}) – розрахунковий шар 3, водотривку товщу неоген-четвертинних відкладень (N_2-Q_1) – розрахунковий шар 4, водоносний горизонт неогенових відкладень (N_{1s}) – розрахунковий шар 5, слабопроникні відкладення кори вивітрювання кристалічного масиву ($MZ-KZ$) – розрахунковий шар 6, і водовмісну тріщинувату зону кристалічних порід ($AR-PR$) – розрахунковий шар 7.

Зовнішні границі модельованої області в межах вододільних ділянок досліджуваної території прийняті як гідродинамічні границі третього роду з умовою $Q = f(H)$.

Значення розрахункових фільтраційних параметрів в чисельній моделі встановлені за результатами дослідно-фільтраційних робіт і даними лабораторних визначень з урахуванням характерних для модельованих порідних різностей величин гідравлічної проникності.

При вирішенні епігнозних задач виконувалося коригування прийнятих до розрахунку гідродинамічних параметрів та оцінка збіжності чисельної моделі за фактичними даними про рівневий режим підземних вод.

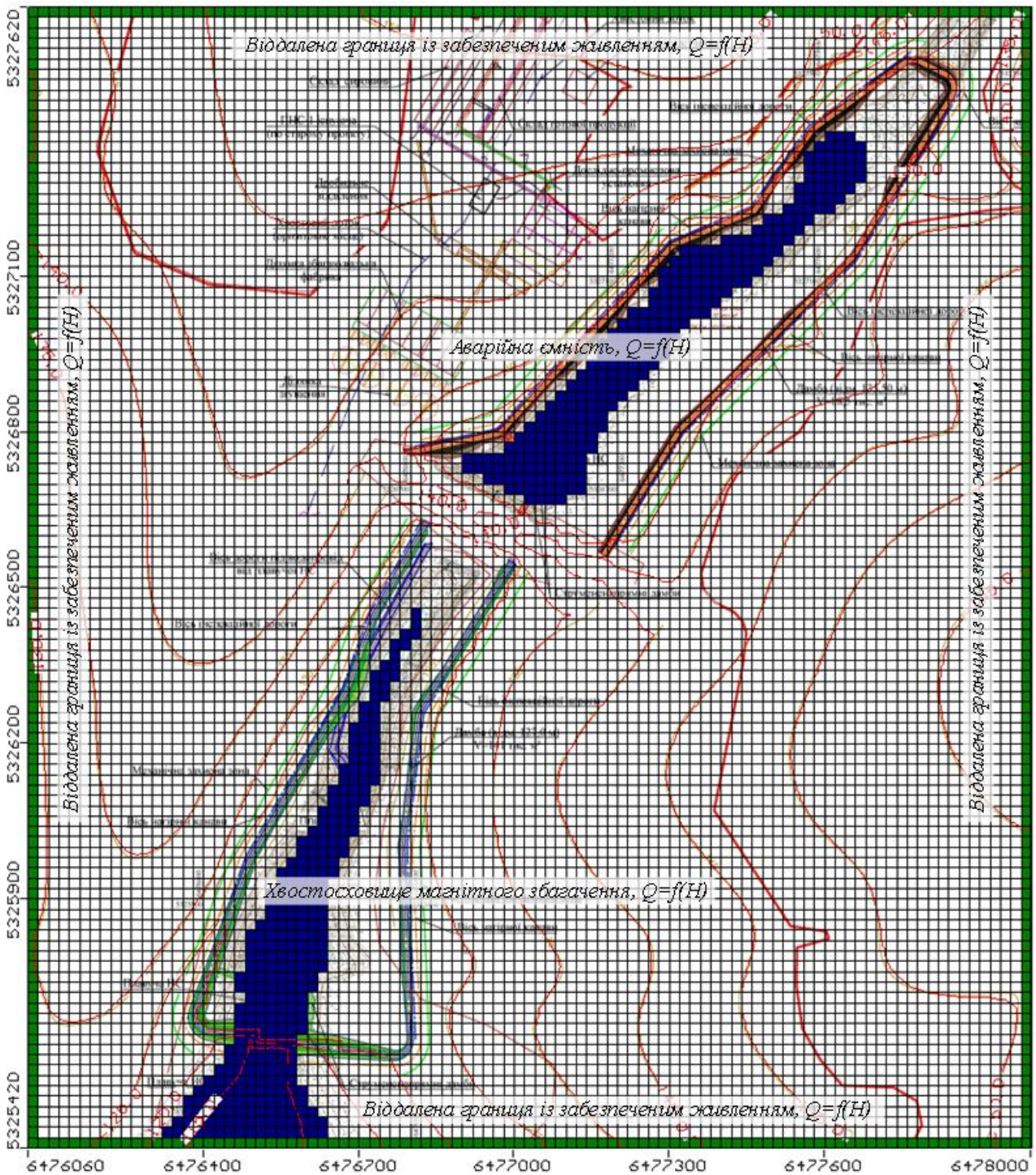


Рис. 2. Розрахункова схематизація модельованої області

При вирішенні прогнозних задач до розгляду були прийняті варіанти, що відповідають варіантам розміщення проектного хвостосховища:

– варіант 1 – хвостосховище № 1 – відсік, який розміщується на майданчику раніше відведеного під аварійну ємність, розташований в балці на схід від дослідно-промислової установки, максимальна відмітка води в проектованому хвостосховищі на кінець експлуатації 134.00 м;

– варіант 2 – хвостосховище № 2 – відсік, який розміщується в північній ділянці майданчика хвостосховища магнітного збагачення, максимальна відмітка води в проектованому хвостосховищі на кінець експлуатації 125.50 м.

Отримані розрахункові рівні води для модельованих водоносних горизонтів погоджуються з даними спостережень в гідрогеологічних свердловинах, згідно з якими відмітки рівнів води знаходяться в межах 134,45...143.75 м (св. №№ 1937, 1938) і 137,54...140.57 м (св. 2024, 2029) відповідно для четвертинного і неогенового водоносних горизонтів.

Згідно з даними епігнозного моделювання, деформації рівневих поверхонь підземних вод як четвертинного, так і неогенового водоносних горизонтів пов'язані переважно з наявними в балці Криничуватська об'ємами акумульованих вод з відмітками дзеркала 129,10 м і 118,50 м відповідно у відсіках аварійної ємності і хвостосховища магнітного збагачення.

Формування гідродинамічного режиму досліджуваної території в границях модельованої області відбувається за рахунок природних і техногенних складових водного балансу: інфільтраційного живлення – 5,31%, бічного притоку із суміжних територій – 80,96%, а також живлення підземних вод в межах балки Криничуватська – 9,57%.

Розвантаження водоносних горизонтів відбувається переважно за рахунок відтоку підземних вод за межі модельованої області – 78,12%, а також їх розвантаження в межах тальвегу балки Криничуватська – 21,88%.

За наявності в межах відсіків балки Криничуватська акумульованих об'ємів води зв'язок між поверхневими і підземними водами носить різноспрямований характер у живленні-розвантаженні на різних ділянках тальвегу балки. Так, на ділянці аварійної ємності при існуючій відмітці дзеркала води 129,10 м переважає живлення підземних вод, а на ділянці хвостосховища магнітного збагачення з відміткою дзеркала води 118.50 м – їх розвантаження.

Прогнозна оцінка гідродинамічного режиму виконана для варіантів розміщення проектового хвостосховища в межах майданчика раніше відведеного під аварійну ємність на схід від дослідно-промислової установки (варіант 1), і майданчика хвостосховища магнітного збагачення (варіант 2) – рис. 3, 4.

При виконанні розрахунків в чисельній моделі передбачалась наявність в межах чаші проектового хвостосховища протифільтраційного екрану, виконаного із ущільненого суглинку потужністю 1,5 м з розрахунковим коефіцієнтом фільтрації 0,04 м/доб.

Для оцінки очікуваних змін рівневого режиму четвертинного і неогенового водоносних горизонтів приймалося, що експлуатація проектового хвостосховища з максимальними відмітками води 134,00 м і 125,5 м відповідно для варіантів 1 і 2 буде відбуватися при підтримці досягнутого рівня води у відсіках аварійної ємності (абсолютна відмітка води за даними зйомки 129,10 м) і хвостосховища магнітного збагачення (абсолютна відмітка води 118,50 м).

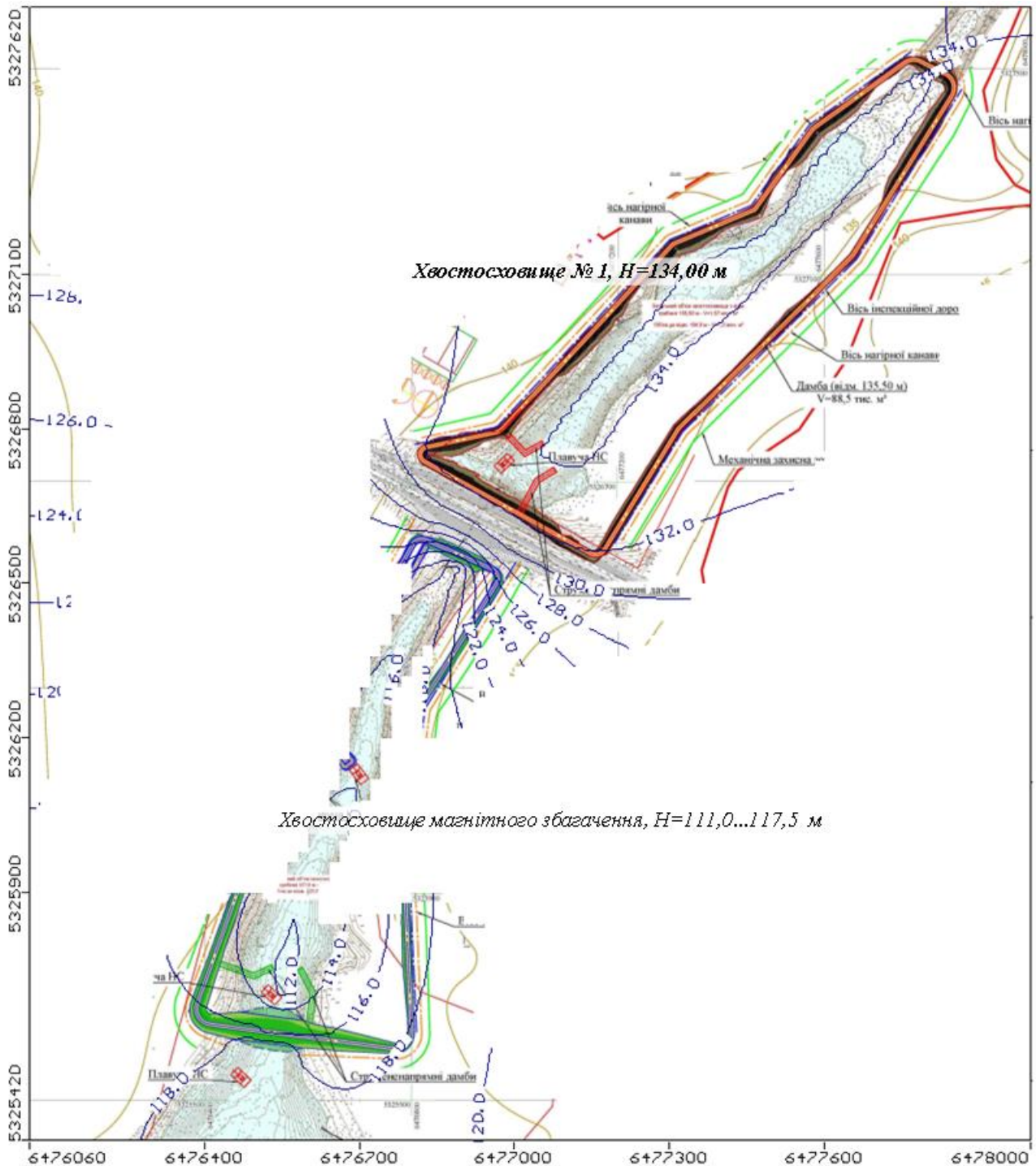


Рис. 3. Рівнева поверхня підземних вод четвертинного горизонту (Q_{I-IV}), хвостосховище № 1 у відсіку аварійної ємності (варіант 1)

За результатами аналізу модельних розрахунків встановлено, що при будівництві хвостосховища № 1 з відміткою рівня води 134,00 м в межах відведеного під аварійну ємність майданчика (варіант 1) на прилеглий території буде відбуватися формування четвертинного водоносного горизонту з очікуваним підняттям рівня води на величину до 6,13 м.

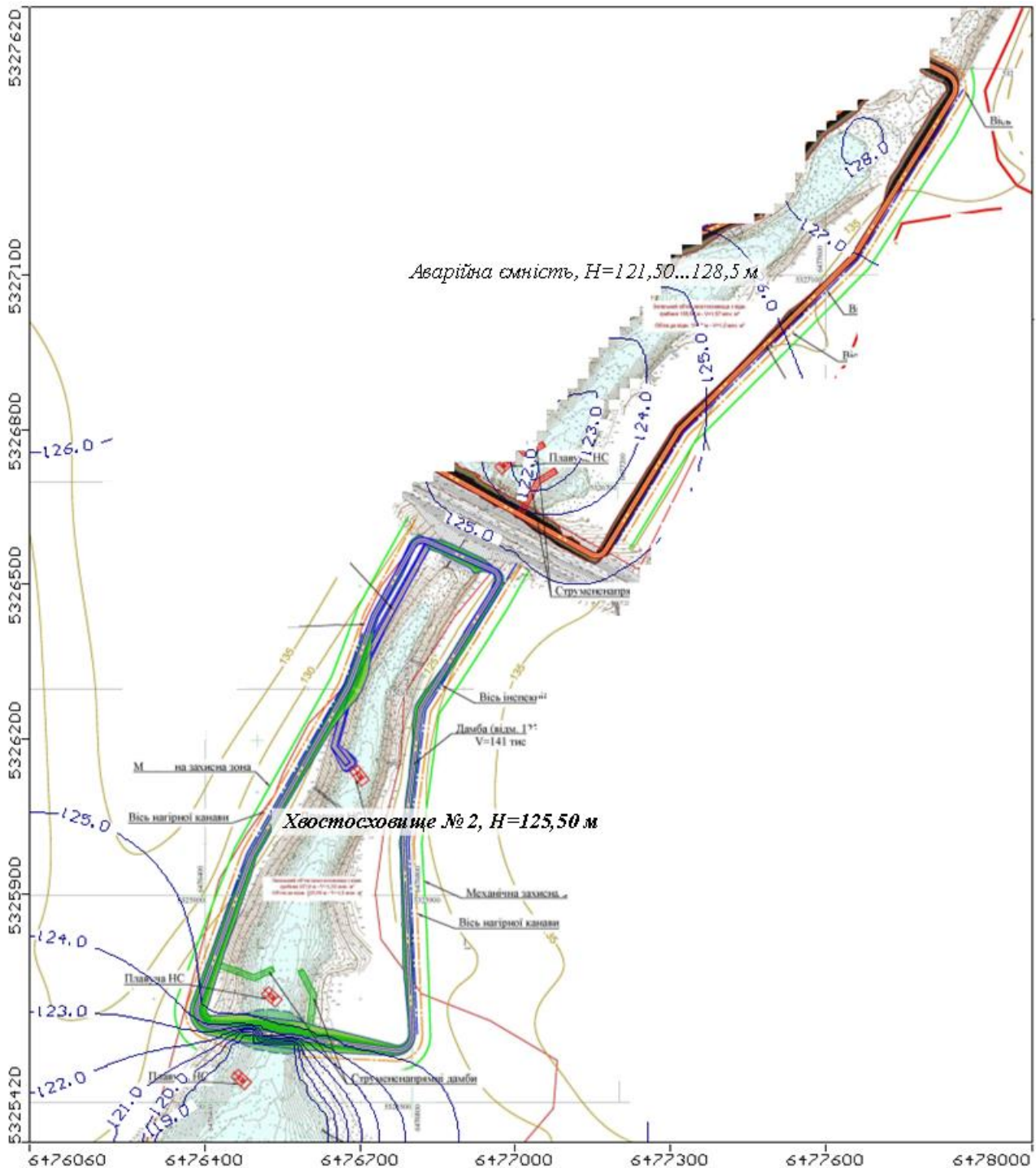


Рис. 4. Рівнева поверхня підземних вод четвертинного горизонту (Q_{I-IV}), хвостосховище № 2 у відсіку хвостосховища магнітного збагачення (варіант 2)

Особливістю фільтраційного потоку у даному варіанті буде його розвантаження в розташований нижче за рельєфом відсік хвостосховища магнітного збагачення.

Аналогічна картина буде спостерігатися при будівництві хвостосховища № 2 з відміткою рівня води 134,00 м в межах відсіку хвостосховища магнітного збагачення (варіант 2). Очікуване підняття рівня води в межах прилеглої території також буде досягати величини до 7,0 м, однак у даному випадку розвантаження фільтраційних вод в бік аварійної ємності буде практично відсутнім.

Оцінка фільтраційних втрат з проектного хвостосховища за варіантами його розміщення (хвостосховище № 1 і хвостосховище № 2) виконана за результатами аналізу балансових складових модельованої області (табл. 1 і 2).

Таблиця 1

Балансові складові модельованої області за результатами рішення прогнозової задачі, хвостосховище № 1 (варіант 1), м³/доб

Складові балансу	Живлення	Розвантаження
Інфільтрація	35,080	–
Взаємозв'язок з поверхневими водами	144,530	–197,670
у тому числі:		
– хвостосховище № 1	144,500	–1,285
– хвостосховище магнітного збагачення	0,000	–183,220
Витрати по контуру	533,040	–514,421
Ємнісна складова	0,168	–0,604
Всього	712,817	–712,695
Похибка		0,122
Нев'язка, %		0,020

Таблиця 2

Балансові складові модельованої області за результатами рішення прогнозової задачі, хвостосховище № 2 (варіант 2), м³/доб

Складові балансу	Живлення	Розвантаження
Інфільтрація	35,080	–
Взаємозв'язок з поверхневими водами	197,681	–254,233
у тому числі:		
– аварійна ємність	48,504	–6,586
– хвостосховище № 2	149,180	–81,678
Витрати по контуру	538,109	–518,660
Ємнісна складова	0,267	–0,202
Всього	771,137	–771,095
Похибка		0,042
Нев'язка, %		0,010

Згідно з даними модельних розрахунків при збереженні загальної структури балансових складових підземних вод в межах модельованої області будівництво і експлуатація хвостосховища призведе до відповідних змін у співвідношенні живлення-розвантаження безпосередньо на ділянках проектного розташування гідропоруди.

При розміщенні проектного хвостосховища № 1 у відсіку аварійної ємності (варіант 1) величина фільтраційних втрат із чаші хвостосховища при проектній відмітці рівня води 134,00 м і підтриманні існуючого положення рівня води в хвостосховищі магнітного збагачення (118,50 м) складе 144,50 м³/доб. При цьому очікуване надходження підземних вод до відсіку хвостосховища магнітного збагачення зросте до 183,22 м³/доб.

За умови розташування проектного хвостосховища № 2 у відсіку хвостосховища магнітного збагачення (варіант 2) величина фільтраційних втрат із чаші хвостосховища при проектній відмітці рівня води 125,50 м і підтриманні існуючого положення рівня води в аварійній ємності (129,10 м) складе 149,18 м³/доб. Розрахункове надходження підземних вод до аварійної ємності у даному випадку буде становити 6,586 м³/доб.

Слід відмітити, що за умови осушення відсіку хвостосховища магнітного збагачення або відсіку аварійної ємності при розміщенні проектного хвостосховища за варіантом 1 або варіантом 2 величини фільтраційних втрат з проєктованих хвостосховищ № 1 і № 2 складуть відповідно 213,42 м³/доб і 172,00 м³/доб, а зростання розвантаження підземних вод до відсіків хвостосховища магнітного збагачення і аварійної ємності – відповідно до величин 222,82 м³/доб і 64,80 м³/доб.

Висновки. До особливостей геолого-гідрогеологічних умов території проєктованого будівництва відноситься наявність четвертинного і неогенового водоносних горизонтів, а також водоносного горизонту тріщинної зони кристалічних порід, які мають відносно ускладнений гідравлічний зв'язок через наявність в геологічному розрізі водотривких відкладень неоген-четвертинного віку та кори вивітрювання кристалічного масиву.

На ділянках розвитку четвертинного водоносного горизонту в межах схилових ділянок балки Криничуватська гідродинамічний режим підземних вод визначається їх живленням-розвантаженням в залежності від режиму поверхневих вод, акумульованих у відсіках аварійної ємності і хвостосховища магнітного збагачення.

Згідно з результатами виконаних розрахунків будівництво і експлуатація хвостосховища за варіантами його розміщення, за відсутності дренажних споруд і наявності протифільтраційного екрану з шару ущільнених суглинку потужності 1,5 м і коефіцієнтом фільтрації 0,04 м/доб, призведе до загального підйому рівня води в межах прилеглої території від 0,1 до 6,13...7,0 м. Очікуваний підйом рівня води визначається рівнем фільтраційними втрат з хвостосховища в межах 144,50...213,42 м³/доб і 149,18...172,00 м³/доб відповідно для першого і другого варіантів його проектного розміщення (хвостосховище № 1 і № 2).

Зважаючи на результати моделювання гідродинамічного режиму проектного хвостосховища в умовах, що розглядаються, більш доцільним слід вважати його будівництво за другим варіантом – на ділянці відсіку хвостосховища магнітного збагачення, що забезпечить менші обсяги фільтраційних втрат з хвостосховища при практичній відсутності надходження підземних вод до відсіку аварійної ємності.

Перелік посилань

1. Тимошук В.І. (2019). Оцінка гідрогеомеханічної стійкості гідротехнічних споруд на основі даних про розрідження ґрунтів в умовах можливих сейсмічних впливів. *Матеріали науково-технічної конференції. ТОВ «Фундаментстроймакс»*. 31–32.
2. Тимошук, В.І., & Шерстюк, Є.А. (2022). Комплексна оцінка стану гідротехнічних споруд Ладжинської ТЕС у зв'язку з їх реконструкцією. *Збірник наукових праць НГУ*, 69, 120–132. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.120>
3. Тимошук, В.І., & Тимошук, Є.В. (2023). Математичне моделювання геомеханічного стану техногенного породного масиву в умовах дії сейсмічного навантаження. *Збірник наукових праць НГУ*, 74, 163–179. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.163>
4. Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater modeling*. Amsterdam: Elsevier.
5. McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr83875>
6. McWhorter, D.B., Sunada, D.K., & Sunada, D.K. (1977). *Ground-water hydrology and hydraulics*. Water Resources Publication.

ABSTRACT

The aim of the study is to predict the hydrodynamic regime of the proposed tailing dump at the East-Valyavka iron ore deposit to justify the selection of its construction site.

Research methods. To predict the hydrodynamic regime and estimate filtration losses from the tailing dump, a numerical geofiltration model was developed in the Visual MODFLOW software package, which simulates a three-dimensional groundwater flow of constant density in a porous medium. The forecasting methodology involved a series of filtration and water-balance calculations, with a comparative assessment of changes in the hydrodynamic regime at the construction site based on alternative location options for the proposed tailing dump.

Results of the study. Using the method of mathematical modeling, a forecast of changes in the hydrodynamic regime of groundwater at the construction site was developed and an assessment of filtration losses from the designed tailing dump for its location options was performed. Based on the analysis of the balance components of the numerical model, the nature of groundwater supply and discharge was determined and the parameters of their hydrodynamic connection with surface water were established. Based on the modeling results, the choice of a hydrodynamically feasible tailing dump location was substantiated and measures to reduce filtration losses were identified.

Novelty. Based on the results of mathematical modeling, the paper establishes the dependence of the hydrodynamic regime of the designed tailing dump on the conditions of groundwater supply and discharge at the construction site, their connection with the regime of accumulated surface water within the existing hydraulic structures and the peculiarities of the geological and hydrogeological structure of the studied area in accordance with the options for the location of the hydraulic structure.

Practical significance of the results. The modeling results and estimates presented in this paper can be used to substantiate the projects for the construction of hydraulic structures in complex geological and hydrogeological conditions.

Keywords: tailing dump, hydrodynamic regime, geofiltration model, mathematical modeling.