



Білеуш А. І. [1; ORCID ID: 0000-0002-7292-999X],

д.т.н., професор,

Фрідріхсон В. Л. [1; ORCID ID: 0000-0003-4001-8646],

к.т.н., с.н.с.,

Кривоног О. І. [1; ORCID ID: 0000-0002-8435-3393],

к.т.н., с.н.с.,

Кривоног В. В. [1; ORCID ID: 0000-0002-3788-6947],

к.т.н., с.н.с.

¹Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ

ЗМЕНШЕННЯ БАРАЖНОГО ЕФЕКТУ ВІД ЗАГЛИБЛЕНИХ СПОРУД В СКЛАДНИХ ТОПОГРАФІЧНИХ І ІНЖЕНЕРНО-ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

В статті наводяться результати досліджень авторів щодо забезпечення стійкості схилу та зменшення баражного ефекту в результаті будівництва житлового будинку з об'єктами соціального призначення та підземним паркінгом з влаштуванням глибокого котловану і огорожі, яка закріплює його стіни. Для зменшення впливу будівель на зміну гідрологічного режиму на прилеглій до ділянки будівництва території розглянуто два варіанти дренажно-водовідвідних систем, які враховують конструктивні рішення по забудові, генеральний план та вертикальне планування.

Перший варіант передбачає влаштування дренажно-водовідвідної системи, яка складається з пластового дренажу в поєднанні з водозбірними колодязями, а другий варіант – дренажно-водовідвідної системи, яка включає пластовий дренаж в поєднанні з дренажними геомембранами.

Моделювання фільтрації ґрунтових вод у зоні впливу споруд, яке виконано з використанням програмного комплексу «Kust» для ПК, показало, що підвищення рівнів водоносного горизонту під впливом протизсувних стін, огорожі котловану та фундаментів з паль при інфільтрації з коефіцієнтом забезпеченості 0.95 становитиме 0.8–1.52 м.

При влаштуванні дренажу за варіантом 1 підвищення РГВ у межах впливу будівництва зменшується до 0.05–0.1 м, а по варіанту 2 – до 0.1–0.15 м, що близько до природного РГВ.

Ключові слова: баражний ефект; стійкість схилу; дренаж.

Вступ

Баражний ефект – явище, при якому рівень ґрунтових вод (РГВ)

підвищується перед якоюсь перешкодою і знижується за нею. Це відбувається через те, що природний потік підземних вод блокується, наприклад, стіною фундаменту або іншою підземною (заглибленою) спорудою. Заглибленими вважаються споруди, що улаштовуються відкритим способом, верхня позначка яких знаходиться на рівні поверхні землі. Питання впливу заглиблених споруд на динаміку рівнів ґрунтових вод має велике значення тому, що різка зміна їх рівнів, у тому числі і від баражного ефекту, представляє значну небезпеку для існуючих будівель, для нового будівництва, якщо баражний ефект не був врахований на етапі проєктування, а також для навколишнього середовища. Тому зменшення баражного ефекту під час будівництва та подальшої експлуатації споруд має велике значення.

Задачі досліджень. Запропонувати та дослідити кілька варіантів дренажно-водовідвідних систем для зменшення баражного ефекту від заглиблених споруд при їх будівництві в складних інженерно-гідрогеологічних умовах.

Результати роботи

Рельєф майданчика забудови та прилеглих територій характеризується наявністю поблизу крутих схилів зі зміною абсолютних відміток в межах майданчика від 122.50 до 132.40 м. Відповідно до інженерно-геологічних вишукувань на ділянці забудови існує один водоносний горизонт ґрунтових вод, який при спорудженні об'єкта будівництва буде реагувати на заглиблені протизсувні стіни з паль, фундаменти з паль та огорожу котловану.

Сталий безнапірний горизонт ґрунтових вод знаходиться на глибинах 2.4–9.6 м (від поверхні землі), на відмітках 117.92–124.58 м в алювіально-делювіальних та еолових відкладеннях. Нахил дзеркала підземних вод відповідає загальному нахилу рельєфу. Водонасичені породи водоносного горизонту виклинюються в нижній частині схилу.

Живлення ґрунтових вод в межах зони впливу ділянки забудови відбувається за рахунок припливу підземних вод з більш високих відміток, інфільтрації атмосферних опадів і технічних втрат води із водопровідних інженерних комунікацій. Водотривом водоносного горизонту служить наглинок та мергельні глини.

Для визначення фільтраційної витрати в межах майданчика забудови до початку будівництва було намічено два розрахункових створи А-А і Б-Б. Напрямок потоку визначено по рівню ґрунтових вод в свердловинах, які розділені між створами залежно від їх відстані до створу.

За формулою Дюпюї було визначено питому фільтраційну



витрату q , що проходить на ділянці забудови в напрямку від створу до створу [1–2].

$$q = K_{сер} \cdot I_{сер} \cdot h_{сер}, \quad (1)$$

де $K_{сер}$ – середньозважений коефіцієнт фільтрації ґрунтів всієї ділянки забудови в межах глибини будівництва, $K_{сер} = 0.305$ м/добу; $h_{сер}$ – середня потужність водонесучих порід в створах, $h_{сер} = 12.38$ м; $I_{сер}$ – середній градієнт фільтраційного напору між створами, $I_{сер} = 0.044$.

Згідно з розрахунком за формулою (1) питома фільтраційна витрата буде $q = 0.166$ м²/добу.

При ширині забудови $B = 89.7$ м фільтраційна витрата Q в межах майданчика забудови до початку будівництва становила $Q = q \cdot B = 14.9$ м³/добу.

Середня швидкість фільтраційного потоку на ділянці між створами при $K_{сер} = 0.305$ м/добу та $I = 0.044$ становить $V_{сер} = 0.013$ м/добу.

За методикою Павловського М. М., яка базується на теорії фільтрації в однорідних ґрунтах, аналітичним шляхом проведено розрахунок можливого надходження води в глибокий котлован після його влаштування за умови водонепроникності огороження котловану [1–2].

Огороження котловану, заглиблене нижче його дня, приймали в якості шпунта і рахували як водопроникне. Діаметр паль складав 820 мм, відмітка дна котловану – 118.5 м, низу палі-шпунта – 106.5 м.

План забудови представлено на рис. 1. Будівля має складну форму, в середньому її розміри дорівнюють 90 на 66 м.

Фільтраційні витрати надходять в котлован з чотирьох сторін (ділянки 1–4, рис. 1). Розподіл швидкостей фільтраційного потоку в місці його виходу в котлован на рівні дна котловану визначається за рівнянням [1]

$$V = KH \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{S^2 + x^2}} \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad (2)$$

де K – середньозважений коефіцієнт фільтрації ґрунту основи дна котловану, S – заглиблення шпунта від дна котловану, $S = 12.6$ м; H – напір на огороження котловану, м. Рівень води на ділянці прийнятий на позначці 123.73 м); $x = 24.5$ м.

Питома фільтраційна витрата, яка надходить в котлован зі сторони огороження котловану, визначається з врахуванням залежності (2) за формулою

$$q = KH \frac{1}{\pi} \cdot \text{Arch} \left(-\frac{x}{S} \right) \quad -\infty \leq x \leq -S. \quad (3)$$

Загальна фільтраційна витрата, яка надходить в котлован по його периметру, дорівнює

$$Q = q \cdot B. \quad (4)$$

Для середньозваженого коефіцієнту фільтрації ґрунту основи дна котловану $K = 0.187$ м/добу і заглибленні огороження котловану $S = 12.6$ м можливий приток води в котлован становить $Q = 81.05$ м³/добу. Результати розрахунків приведено в таблиці.

Таблиця

№ ділянки	K, м/добу	B, м	S, м	H, м	q, м ² /добу	Q, м ³ /добу	V, м/добу	
1	0.20	90.0	12.6	5.23	0.43	38.40	0.012	
2	0.20	68.0	12.6	4.53	0.37	25.11	0.010	
3	0.175	49.0	12.6	2.28	0.16	7.97	0.0046	
4	0.175	90.0	12.6	1.49	0.11	9.57	0.0030	
$\Sigma = 81.05$								

Для наближеного розрахунку величини баражного ефекту від бокового припливу ґрунтової води весь фронт бокового припливу до котловану було розділено на три створи свердловин довжиною L_i для кожного створу.

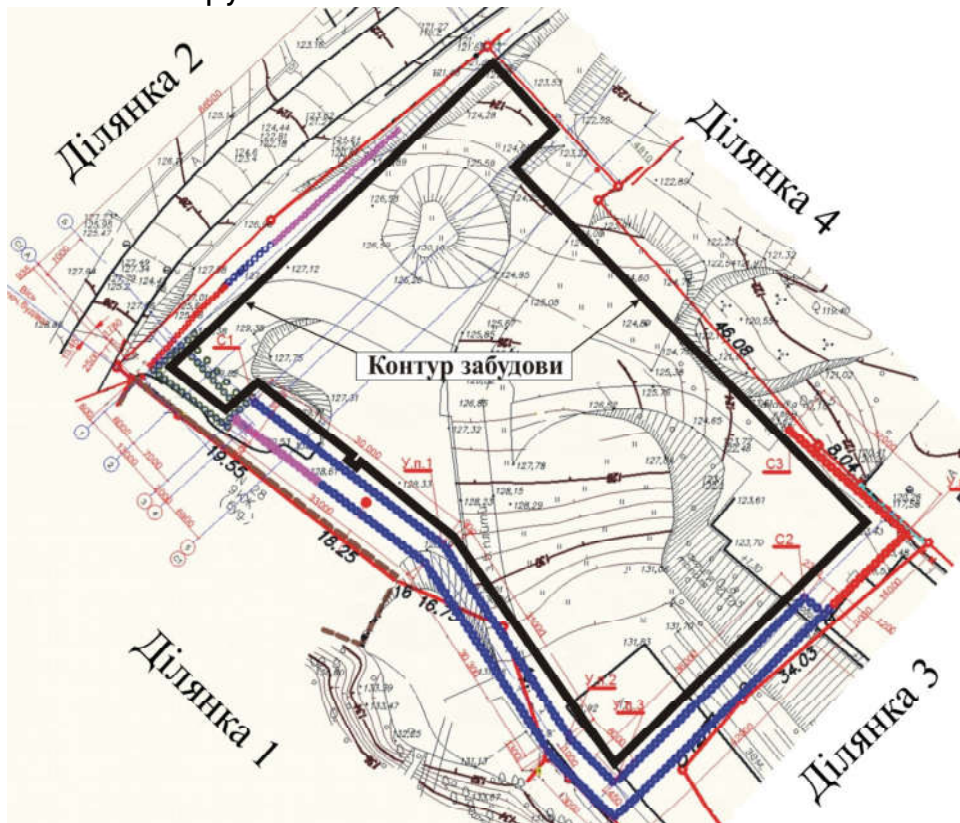


Рис. 1. План забудови



Величина підйому ґрунтових вод від дії баражного ефекту була визначена за формулою А. А. Плетньова

$$\Delta H = \frac{I_{сер} \cdot L}{1.78}, \quad (5)$$

де $I_{сер}$ – середньозважений градієнт напору ґрунтового потоку по трьом створам, $I_{сер} = 0.0346$; $L = L_1 + L_2 + L_3$ – загальна довжина фронту бокового припливу ґрунтових вод, $L = 90.15$ м.

В середньому рівень ґрунтових вод в створі інженерно-геологічного розрізу по фронту бокового припливу до котловану піднявся на 1.75 м.

Величину баражного ефекту було визначено також на основі вирішення профільної задачі фільтрації за допомогою моделювання. Моделювання фільтрації ґрунтових вод у зоні впливу заглиблених споруд виконано з використанням програмного комплексу «Kust» для ПК. Баражний ефект і характер фільтраційного потоку поблизу котловану, параметри фільтраційного потоку в зоні його виходу в котлован, його швидкості і градієнти визначались для трьох інженерно-геологічних розрізів.

Для визначення підпору у зонах ущільнених пальовими фундаментами, було використано метод приведення ущільненої зони ґрунтів до умовної смуги з меншим коефіцієнтом фільтрації, який визначали за формулою

$$K_3 = K(1 - \sigma)^2. \quad \sigma = 1 - \frac{F - N_c F_c}{F} = \frac{N_c F_c}{F}, \quad (6)$$

де K_3 – коефіцієнт фільтрації у смугі умовної протифільтраційної стінки, F – площа смуги, що ущільнюється стінкою або фундаментом з паль, N_c – кількість паль у площині фундаменту або стінки, F_c – площа однієї палі.

По результатам моделювання встановлено, що підвищення рівнів водоносного горизонту під впливом протизсувних стін, огорожі котловану та фундаментів з паль при інфільтрації з коефіцієнтом забезпеченості 0.95 становитиме 0.8–1.52 м.

На рис. 2 показано дані моделювання положення кривої депресії після влаштування огорожі котловану з паль для одного з трьох інженерно-геологічних розрізів, для якого величина баражного ефекту дорівнює 0.8 м.

Для зменшення впливу будівництва на зміну гідрогеологічного режиму на прилеглий до ділянки будівництва території розглянуто два варіанти дренажно-водовідвідних систем, які враховують



Водозбірні колодязі, які розміщено в створі вздовж водонепроникної стінки на ділянці 1, виконують функцію по усуненню негативного впливу баражного ефекту на довкілля і підтримують природний рівень ґрунтових вод на позначці 123.39 м. Для цього створу характерна присутність добре водопроникного шару середньозернистого піску з коефіцієнтом фільтрації 7.4 м/добу потужністю 0.8–1.4 м.

Колодязі розкривають шар середньозернистого піску на всю глибину до відмітки 120.90 м. На дні колодязя укладають шар геотекстильного матеріалу, поверх якого влаштовують перехідний зворотний фільтр, нижній шар – з крупнозернистого піску фракцією 0.5–2 мм товщиною 0.1–0.2 м, який в мішках з нетканого полотна опускають на дно колодязя, а зверху – шар фільтру з гравію фракцією 5–15 мм товщиною 0.2 м.

Рівень води в колодязі підтримується водовідвідною трубою на позначці 121.72 м, по якій вода з колодязя відводиться в пластовий дренаж.

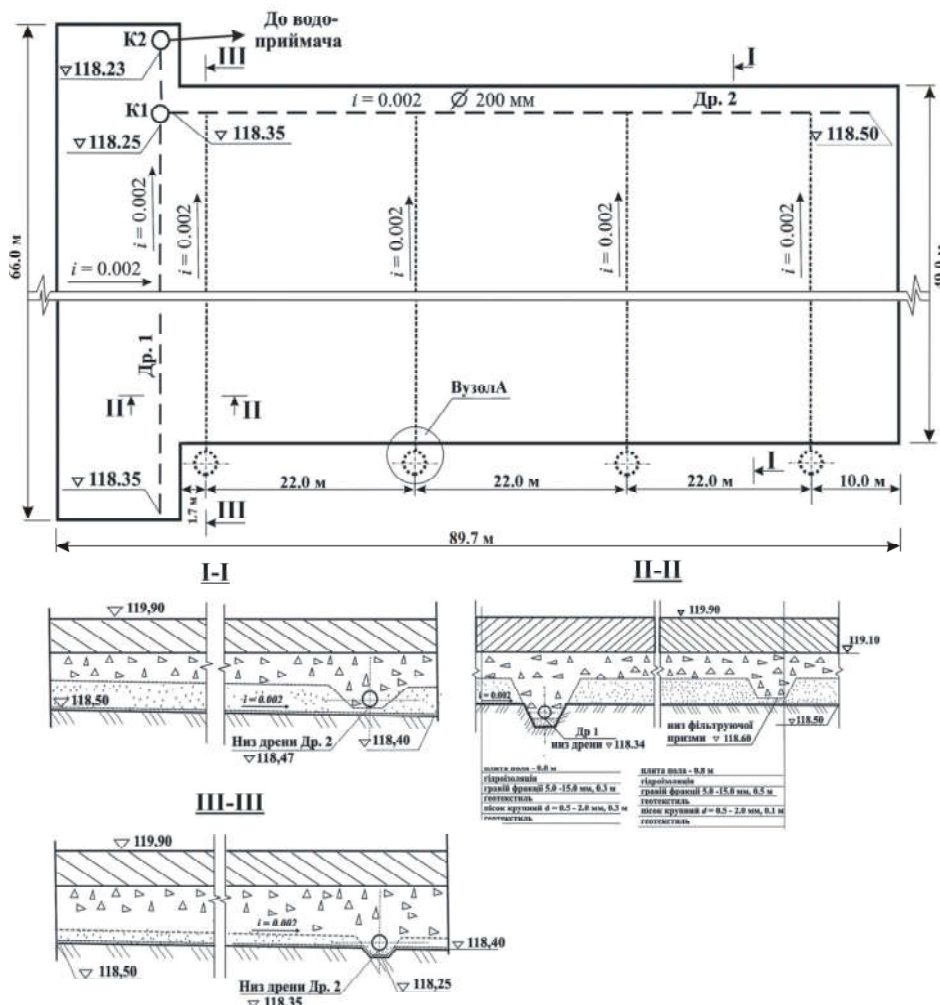


Рис. 3. Схема дренажу за варіантом I та його конструктивні рішення

Для розрахунку дебіту колодязя прийнята розрахункова схема притоку ґрунтової води до недосконалого колодязя в шаруватому пласті [4].

В цьому випадку дебіт колодязя радіусом r_0 вираховується за формулою

$$Q = 1.36 \frac{K(H_1^2 - t^2)}{\lg \frac{R}{r_0}} \left[1 + 7 \sqrt{\frac{r_0}{2H_1}} \cos \frac{\pi H_1}{2H} \right], \quad (7)$$

де H – потужність водоносного шару, $H = 14.12$ м; H_1 – глибина ґрунтової води від природного рівня ґрунтових вод до дна колодязя, $H_1 = 2.49$ м; K – середньозважений коефіцієнт фільтрації ґрунтів в створі улаштування колодязів, $K = 0.53$ м/добу; t – глибина води в колодязі, $t = 0.8$ м; R – радіус впливу колодязя, $R = 25$ м, r_0 – радіус колодязя, $r_0 = 1$ м.

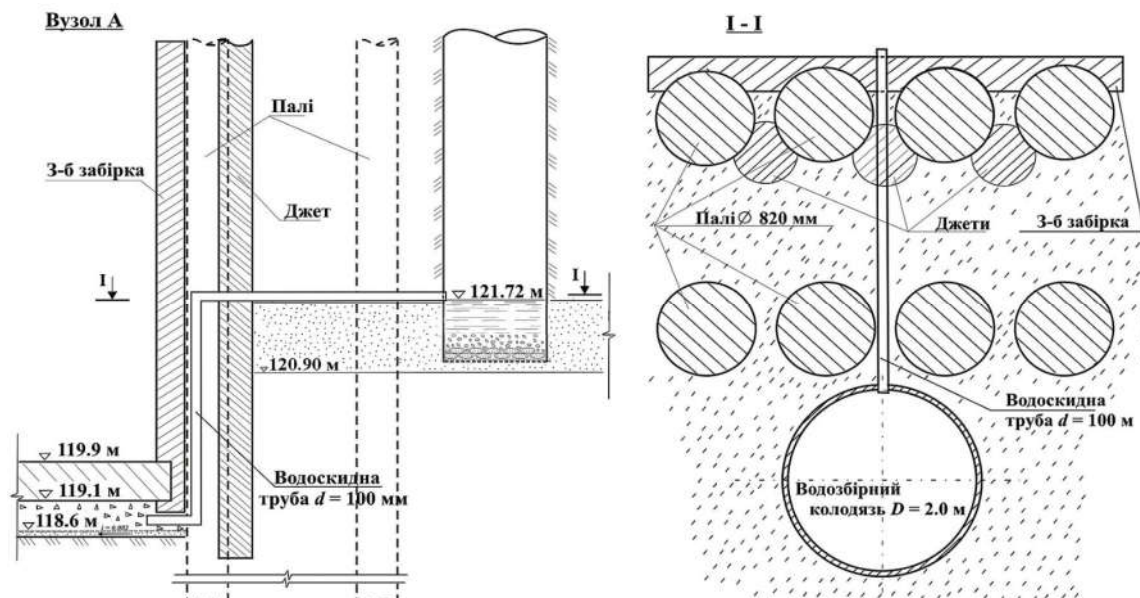


Рис. 4. Конструктивна схема вузла А

Розрахунком встановлено, що дебіт колодязя $Q = 11.5$ м³/добу. Боковий приток до котловану на цій ділянці становить 38.4 м³/добу. Для підтримки природного рівня ґрунтових вод на позначці 123.39 м необхідно улаштування в створі 4 колодязів на відстані 22 м один від одного.

Розрахунок припливу води до пластового дренажу при його роботі в безнапірних умовах виконано за формулою А. Ж. Муфтахова [5].

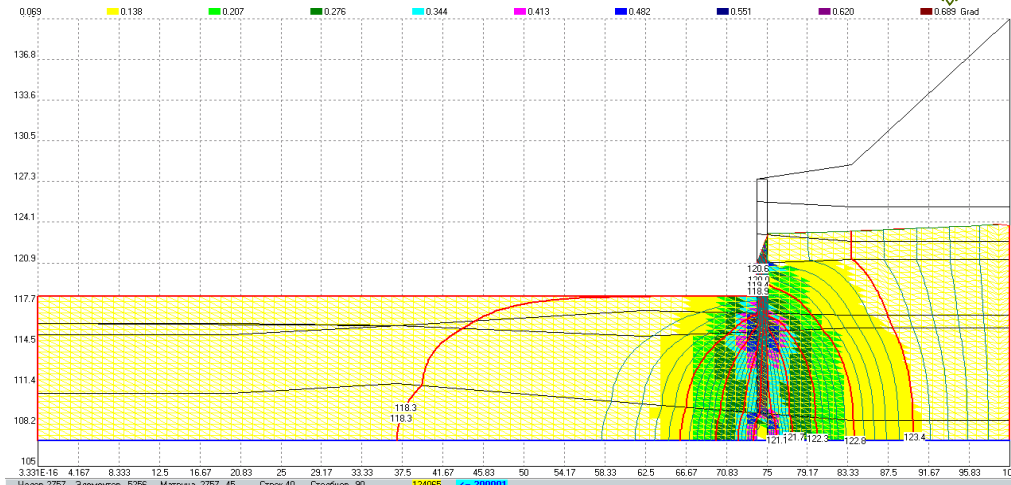


Рис. 5. Кінематична структура фільтраційного потоку по розрізі після будівництва огорожі котловану з паль та дренажу за варіантом 1. Скид ґрунтової води з дренажного колодязя на позначці 121.7 м

$$Q = \pi K_{\text{сер}} h \left(\frac{h}{\ln \frac{R}{r_o}} + \frac{2r_o}{F_{\text{пл.др.}}} \right), \quad (8)$$

де $K_{\text{сер}}$ – середньозважений коефіцієнт фільтрації ґрунтів ділянки забудови, $K_{\text{сер}} = 0.305$ м/добу; R – радіус кривої депресії, $R = 60.2$ м; h – зниження рівня води при роботі пластового дренажу, $h = 2.65$ м; r_o – приведений радіус контуру споруди, $r_o = 38.5$ м; $F_{\text{пл.др.}}$ – показник гідравлічного опору пластового дренажу, $F_{\text{пл.др.}} = 3.2$ м.

Напір на пластовий дренаж прийнято як середній природний рівень ґрунтових вод на позначці 121.75 м (без врахування висоти підвищення рівня ґрунтових вод на 1.5 м від баражного ефекту в створі інженерно-геологічного розрізу на ділянці I).

Розрахунками встановлено величину припливу ґрунтової води до пластового дренажу, яка становить $Q = 76.1$ м³/добу.

Моделювання роботи дренажу по цьому варіанту з використанням програмного комплексу «Kust» приведено на рис. 5.

Співставлення результатів моделювання (рис. 5) з даними моделювання цього ж інженерно-геологічного розрізу без дренажу (рис. 2) показує, що дренаж зменшує величину баражного ефекту до 0.05–0.1 м. Таке співставлення показує, що дренаж, виконаний за варіантом 1, може підтримувати РГВ близький до природного.

Варіант 2 – Влаштування дренажно-водовідвідної системи, яка складається з пластового дренажу в поєднанні з дренажними

геомембранами.

Схема дренажу за варіантом 2 та його конструктивні рішення представлено на рис. 6, а моделювання роботи дренажу по цьому варіанту – на рис. 7.

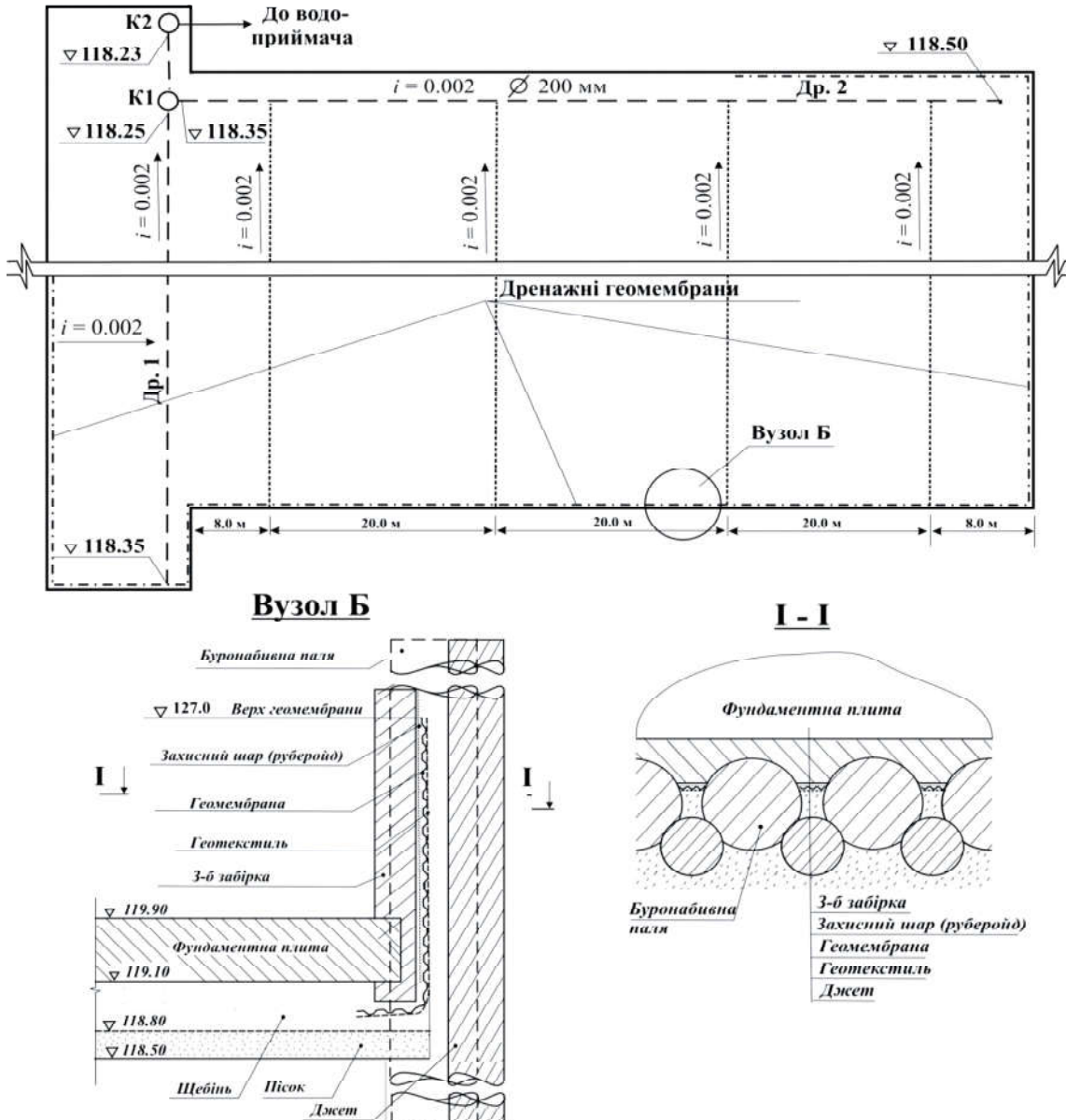


Рис. 6. Схема дренажу за варіантом 2 та його конструктивні рішення

Зіставлення результатів моделювання (рис. 7) з даними моделювання цього ж інженерно-геологічного розрізу без дренажу (рис. 2) показує, що дренаж зменшує величину баражного ефекту до 0.1–0.15 м. Порівняння показує, що дренаж, виконаний за варіантом 2, також може підтримувати РГВ близький до природного.

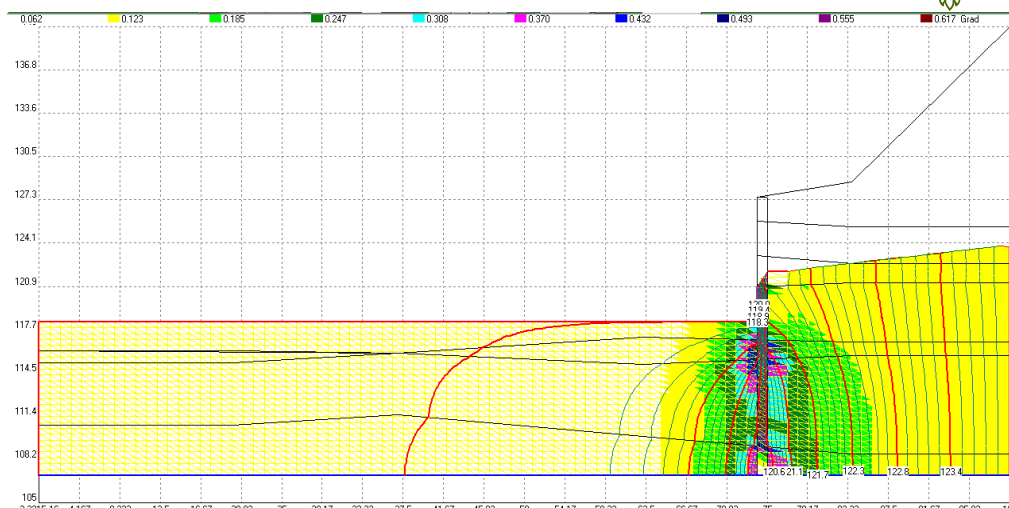


Рис. 7. Кінематична структура фільтраційного потоку по розрізу після будівництва огорожі котловану з паль та дренажу за варіантом 2

Таким чином, дренаж за варіантом 2 значно зменшує величину баражного ефекту. Для прийняття ґрунтової води, що височується вище джета в межах водонепроникної стіни, пропонується застосувати геомембрану, яка буде виконувати функції пристінного дренажу.

Дренажна геомембрана у своєму складі має фільтраційний шар – нетканий геотекстиль, який непроникний для ґрунту і захищає водовідвідні канали мембрани. Залежно від величини тиску ґрунту використовують геомембрани різних конструкцій: DELTA-TERRAXX, DELTA-MS20 та ІЗОЛІТ.

Дренажну геомембрану улаштовують неширокими смужками, які встановлюються між буронабивними палями по периметру стіни. Верх дренажної мембрани назначають на 0.5 м вище найвищої позначки верха РГВ. Геомембрана гідравлічно поєднана з пластовим дренажем, який скидає дренажний стік в розташовану нижче горизонтальну лінійну дренаж.

При улаштуванні дренажної геомембрани необхідно забезпечити щільне прилягання смужки геомембрани фільтруючою частиною до ґрунту з метою унеможливлення виникнення суфозії ґрунту по контакту фільтруючий геотекстиль – ґрунт. Кріплення геомембрани до паль проводять за допомогою еластичного джгута. З боку залізобетонної заборки геомембрану необхідно захистити міцною водонепроникною плівкою (руберойд) для її захисту від проникнення цементного розчину при влаштуванні бетонної заборки. Ширина плівки повинна бути більшою на 10–15 см смужки геомембрани, яку фіксують на палях планкам (рис. 8).

Висновки

1. Аналіз результатів моделювання показує, що підвищення рівнів водоносного горизонту під впливом протизсувних стін, огорожі котловану та фундаментів з паль при інфільтрації з коефіцієнтом забезпеченості 0.95 становитиме 0.8–1.52 м.



Рис. 8. Улаштування дренажної геомембрани між палями

2. Величина підвищення РГВ в межах впливу будівництва при влаштуванні дренажу за варіантом 1 показує, що дренаж зменшує величину баражного ефекту до 0.05–0.1 м, а за варіантом 2 – до 0.1–0.15 м, що близько до природного РГВ. Таким чином, обидва запропонованих варіанти дренажу ефективно зменшують баражний ефект, тому вибір конкретного варіанту залежить від техніко-економічного обґрунтування.

1. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика / под общей редакцией В. П. Недриги. М. : Стройиздат, 1983. 543 с. 2. Справочник по гидротехнике. Гос. изд-во лит-ры по строительству и архитектуре. М., 1955. 828 с. 3. Білеуш А. І., Бугай М. Г., Фрідріхсон В. Л., Кривоног В. В., Кривоног О. І. Обґрунтування ефективних конструкцій дренажу для захисту прилеглих територій від підтоплення заглибленими спорудами. *Прикладна гідромеханіка*. 2016. № 2. Т. 18 (90). С. 3–10. 4. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений. Л.-М. : Госстройтехиздат, 1955. 291 с. 5. Абрамов С. К. Подземные дренажи в промышленном и городском строительстве. М. : Стройиздат, 1967. 239 с.

REFERENCES:

1. Hydrotekhnicheskye sooruzheniya. Spravochnyk proektyrovshchika / pod obshchei redaktsyei V. P. Nedryhy. M. : Stroiyzdat, 1983. 543 s. 2. Spravochnyk po hydrotekhnike. Hos. yzd-vo lyt-ry po stroytelstvu y arkhytekture. M., 1955. 828 s. 3. Bileush A. I., Buhai M. H., Fridrikhson V. L., Kryvonoh V. V., Kryvonoh O. I. Obgruntuvannya efektyvnykh konstruksii drenazhu dlia zakhystu prylehlykh terytorii vid pidtoplennia zahlyblyenymy sporudamy. *Prykladna hidromekhanika*. 2016. № 2. T. 18 (90). S. 3–10. 4. Aravyn V. Y., Numerov S. N. Fyltratsyonnye raschety hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. L.-M. : Hosstroitekhyzdat, 1955. 291 s. 5. Abramov S. K. Podzemnye drenazhy v promyshlennom y horodskom stroytelstve. M. : Stroiyzdat, 1967. 239 s.



Bileush A. I. [1; ORCID ID: 0000-0002-7292-999X],

Doctor of Engineering, Professor,

Fridrikhson V. L. [1; ORCID ID: 0000-0003-4001-8646],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow,

Kryvonoh O. I. [1; ORCID ID: 0000-0002-8435-3393],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Researcher Fellow,

Kryvonoh V. V. [1; ORCID ID: 0000-0002-3788-6947],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Researcher Fellow

¹Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

REDUCTION OF THE BARRAGE EFFECT FROM BURIED STRUCTURES IN COMPLEX TOPOGRAPHICAL AND ENGINEERING-HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

The article presents the results of the authors' research on ensuring slope stability and reducing the barrage effect as a result of the construction of a residential building with social facilities and underground parking with the installation of a deep pit and a fence securing its walls. To reduce the impact of buildings on changing the hydrogeological regime in the territory adjacent to the construction site, two options for drainage and drainage systems were considered, which take into account design decisions for development, the general plan and vertical planning.

The first option involves the installation of a drainage and drainage system consisting of a layer drainage in combination with water collection wells, and the second option is a drainage and drainage system that includes a layer drainage in combination with drainage geomembranes.

Modeling of groundwater filtration in the area of influence of structures, which was performed using the Kust software package for PCs, showed that the increase in aquifer levels under the influence of anti-sliding walls, excavation fences and pile foundations during infiltration with a security factor of 0.95 will be 0.8–1.52 m.

When arranging drainage according to option 1, the increase in the groundwater level within the influence of the construction decreases to 0.05–0.1 m, and according to option 2 – to 0.1–0.15 m, which is close to the natural groundwater level.

Keywords: barrage effect; slope stability; drainage.

Отримано: 07 травня 2025 року
Прорецензовано: 01 червня 2025 року
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року