

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки

01-04-90М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни
«ГІДРОТЕХНІЧНІ СПОРУДИ»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне
будівництво, водна інженерія та водні технології»
спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна
інженерія та водні технології»
всіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з якості
навчально-наукового інституту
енергетики,
автоматики та водного господарства
Протокол № 4 від 17.12.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «**Гідротехнічні споруди**» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Волк Л. Р., Корнійчук В. І., Мельничук І. М. – Рівне, НУВГП: 2024. – 28 с.

Укладачі: **Волк Л. Р.**, к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки; **Корнійчук В. І.**, к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки; **Мельничук І. М.**, к.т.н., старший викладач кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Відповідальний за випуск: **Волк Л. Р.** к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Керівник групи забезпечення спеціальності 194 Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології

Клімов С. В.

© Л. Р. Волк,
В. І. Корнійчук
І. М. Мельничук, 2024
© НУВГП, 2024

Вступ

Загальний порядок і правила виконання лабораторних робіт

Під час виконання лабораторних робіт слід дотримуватись таких основних правил і рекомендацій:

1. Кожний студент повинен обов'язково мати робочий зошит для виконання лабораторних робіт. До нього заносяться результати вимірювань, в ньому ведуться необхідні розрахунки викреслюються схеми та таблиці.

2. Кожному студенту необхідно підготуватися до лабораторної роботи. Перед заняттям студенти повинні ознайомитись з темою майбутньої лабораторної роботи за матеріалами лекцій і підручників, детально ознайомитись з відповідним розділом лабораторного практикума. Під час підготовки студент повинен самостійно підготувати журнал, форму якого наведено в кінці кожної лабораторної роботи, а також підготувати до занять необхідні речі (олівці, лінійку або косинець, міліметровий папір тощо).

3. Перед початком занять викладачі проводять перевірку готовності студентів до проведення лабораторної роботи і без знання теоретичних основ майбутньої лабораторної роботи до її виконання студенти не допускаються.

Основні правила техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт

На першому лабораторному занятті студенти після інструктажу ставлять підпис у спеціальному журналі в тому, що вони вивчили правила техніки безпеки та зобов'язуються їх дотримувати в гідротехнічній лабораторії. Після цього студентів допускають до виконання лабораторних робіт.

Основні правила техніки безпеки, які гарантують безпеку як для виконавців, так і для оточуючих зводяться до таких:

1. До роботи на лабораторних установках допускають лише тих студентів, які пройшли інструктаж і добре засвоїли правила техніки безпеки;

2. Лабораторні роботи в спецаудиторіях, лабораторії потрібно проводити тільки в присутності викладача. Під час заняття викладач слідкує за виконанням роботи і дотриманням студентами правил з охорони праці.

3. Особам, які працюють в лабораторіях не дозволяється:

- 3.1. Самостійно підключати пристрої до лінії живлення, усувати самим незначні пошкодження електроприладів;
- 3.2. Самостійно підключати та користуватися електричними вимірювальними приладами;
- 3.3. Дотикатися до електрощитів, кабелів, розеток, а також до рухомих частин насосів і електродвигунів;
- 3.4. Підніматися і самостійно проводити лабораторні та інші види робіт на лотках в спорудах, де висота від підлоги більше 50 см і немає спеціального настилу з огородженням;
- 3.5. Ходити без дозволу викладача та завідувача лабораторії по лабораторним установках та самостійно чіпати елементи лабораторних установок;
- 3.6. Знаходитися у верхньому одязі в аудиторіях не дозволяється. Всі повинні суворо дотримуватися норм просанітарії та пожежної безпеки.

Виконання робіт організують таким чином, щоб студенти могли прозвітувати про роботу до кінця заняття.

Кожний студент звітує перед викладачем індивідуально, при цьому потрібно дати відповіді на питання.

Загальними для всіх лабораторних робіт є такі контрольні питання:

1. Яка мета лабораторної роботи ?
2. Як побудована лабораторна установка?
3. Які необхідно мати прилади для проведення роботи?
4. Які початкові умови створено на модельній установці перед проведенням досліджень?
5. Який порядок проведення досліджень?
6. Як визначати глибини на модельній установці та на моделі споруди?
7. Як визначати витрату, яку подають на модель споруди?
8. За яким критерієм подібності проводять моделювання?

9. Як визначити розміри натурної споруди?
10. Як визначити витрату натурної споруди?
11. Який фізичний зміст спостережуваних процесів?
12. Які можна зробити висновки?

Після успішного захисту звіт з лабораторної роботи зараховують.

Студенти, які пропустили лабораторне заняття, повинні обов'язково відпрацювати його за окремим графіком в позаурочний час.

6 семестр

Лабораторна робота №1 «Дослідження безнапірної фільтрації через однорідну земляну греблю на ґрунтовій моделі»

Мета роботи:

1. Для заданої земляної греблі на водопроникній основі визначити розміри активної зони фільтрації в її основі, вибрати масштаб ґрунтової моделі та запроектувати і виготовити її.

2. Визначити величину питомої фільтраційної витрати на ґрунтовій моделі. Отримані дані перерахувати в натурні умови.

3. Визначити положення кривої депресії на ґрунтовій моделі. Отримані дані перевести в натурні умови.

4. Визначити теоретичним шляхом координати кривої депресії в тілі земляної греблі та порівняти її положення з експериментальними даними.

1 Вихідні дані:

1.1 На основі геологічних вишукувань визначено основні характеристики ґрунту основи греблі та глибину залягання водоупору:

- ґрунт основи греблі – пісок з коефіцієнтом фільтрації $K_{\phi}=50$ м/добу;

- глибина залягання водоупору $T = 10,0$ м.

1.2 Тіло греблі виконано з піску з коефіцієнтом фільтрації $K_{\phi}=50$ м/добу;

- висота греблі $h_{gp} = 30,0$ м;

- ширина гребеня греблі $b_{gp} = 10,0$ м;

- закладення верхового укосу $m_1 = 3$;

- закладення низового укосу $m_2 = 2,5$;

- довжина основи греблі $L_1 = 147,0$ м;

- глибина води у ВБ $H_1 = 26,8$ м;

- глибина води у НБ $H_2 = 6,1$ м;

1.3 Дренажну призму виконано з щебеню й облаштовано по внутрішньому контуру зворотним фільтром:

- коефіцієнти закладання верхового укосу дренажу $m_1' = 1$,
- а низового - $m_2' = 1,5$;
- висота дренажу $h_d = 8,0$ м;
- ширина гребеня дренажу $b_d = 5,0$ м.

Схему земляної греблі приведено на рис. 1.

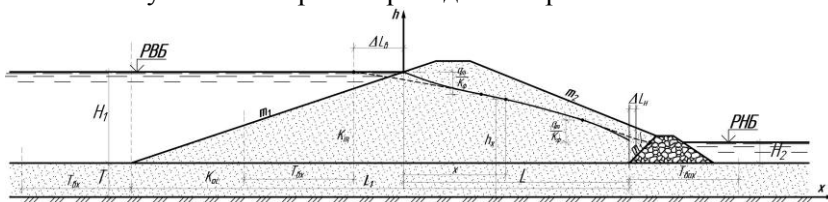


Рис. 1. Схема земляної греблі

2 Визначення активної зони фільтрації в основі греблі

2.1 Згідно з [1] активна зона фільтрації основи земляної греблі визначається із умов:

- 1) якщо $T \leq T_{акт}$, то $T_{акт} = T$;
- 2) якщо $T > T_{акт}$, то $T_{акт} = 0,5L_1$,

де T - дійсне заглиблення водоупору; $T_{акт}$ - глибина активної зони; L_1 - відстань між нижньою точкою верхового укосу греблі і нижньою точкою верхового укосу дренажу.

В нашому випадку $L_1 = 147$ м.

Розрахункова глибина активної зони фільтрації становить

$$T_{акт}' = 0,5L_1 \text{ м.} \quad (1)$$

Згідно умови, коли $T \leq T_{акт}$, приймаємо глибину активної зони рівною $T_{акт} = T = 10,0$ м.

2.2 Довжину вхідної та вихідної ділянки активної зони фільтрації визначено за залежністю [1]

$$T_{вх} = T_{вих} = 0,44T_{акт}' \text{ м.} \quad (2)$$

3 Лабораторні дослідження

3.1 Вибір лінійного масштабу моделі

Лінійний масштаб моделі вибирається із умови розмірів фільтраційного лотка, в якому розміщується модель активної зони фільтрації та споруди.

$$\lambda_{гор} = \frac{T_{вх} + L_1 + T_{вих}}{l_{лотка}} \quad (3)$$

$$\lambda_{верт} = \frac{T + H_1}{h_{лотка}} \quad (4)$$

де $l_{лотка}$ - довжина робочої частини лотка, м; $h_{лотка}$ - висота робочої частини лотка, м.

Приймаємо лінійний масштаб для розмірів моделі та глибин потоку і напорів $\lambda = 100$.

Лінійні розміри моделі та глибин потоку і напорів визначають за рівнянням

$$l_n = \lambda \cdot l_m. \quad (5)$$

Ґрунт земляної греблі не моделюється і прийнято згідно пункту 1.1, тому фільтраційна витрата води через земляну греблю та основу для натурних умов визначається за залежністю

$$Q_{ф.н.} = \lambda^2 \cdot Q_{ф.м.}, \quad (6)$$

де $Q_{ф.м.}$ - витрата фільтраційного потоку на моделі.

3.2 На рис. 2 приведено схему фільтраційного лотка з моделлю земляної греблі. Контроль рівнів води в верхньому і нижньому б'єфах виконується за допомогою спеціальних водозливів. Для визначення положення кривої депресії в тілі греблі влаштовано свердловини.

Витрату води, яка проходить через тіло та основу греблі, визначають об'ємним способом.

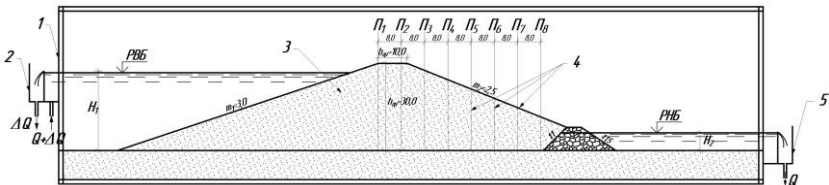


Рис. 2. Схема лабораторної установки для дослідження безнапірного руху фільтраційного потоку в тілі та основі однорідної земляної греблі: 1 – фільтраційний лоток, 2 –

водозлив для контролю рівня води у верхньому б'єфі; 3 – модель споруди; 4 – свердловини; 5 - водозлив для контролю рівня води у нижньому б'єфі

3.3 Обробка експериментальних результатів

3.3.1 Результати досліджень фільтраційної витрати води через тіло та основу греблі на моделі наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Визначення фільтраційної витрати води

№ з/п	Об'єм профільшованої води, W_i , см ³	Час фільтрації t_i , с	Фільтраційна витрата на моделі, $Q_{ф.м.i}$, см ³ /с	Середня фільтраційна витрата на моделі, $\overline{Q_{ф.м}}$, см ³ /с
1.				
2.				
3.				

Фільтраційна витрата для i -го експерименту визначено за залежністю

$$Q_{ф.м.i} = \frac{W_i}{t_i}, \quad (7)$$

де W_i - об'єм профільшованої води, см³; t_i - час фільтрації, с.

Середня фільтраційна витрата на моделі визначена за рівнянням

$$\overline{Q_{ф.м}} = \frac{\sum Q_{ф.м.i}}{n}$$

Тоді фільтраційна витрата через тіло та основу греблі для натурних умов становить

$$Q_{ф.н.} = \lambda^2 \overline{Q_{ф.м}}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

3.3.2 Результати дослідження положення кривої депресії наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Експериментальні дослідження положення кривої депресії

№ з/п	Параметри фільтраційного потоку	Номери свердловин							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Ординати рівня води в свердловинах на моделі, $П_i$, см								
2.	Ординати рівня води в свердловинах для натурних умовах, $П_n$, м								
3.	Відстань x від осі h до осі свердловини, м	9,6	17,6	25,6	33,6	41,6	49,6	57,6	65,6
4.	Теоретичні ординати рівня води в свердловинах для натурних умовах, $П_n$, м								

4 Теоретичні дослідження

4.1 Будуємо криву депресії в земляній греблі теоретичним методом за залежністю

$$h_x = \sqrt{h_c^2 - (h_c^2 - H_2^2) \frac{x - L + T/2}{T/2 + \Delta L_H}}$$

$$\text{де } h_c = 0,9 \frac{q_T}{K_\phi} + H_2;$$

$$\frac{q_T}{K_\phi} = \frac{(H_1)^2 - (H_2)^2}{2L_P + \Delta L_H} + \frac{(H_1 - H_2)T}{L_P + 0,4T}; \quad L_P = L + \Delta L_\phi,$$

$$\Delta L_\phi = 0,4(H_1 + T); \quad \Delta L_H = \frac{m_1 H_2}{3},$$

де h_c - осереднена ордината кривої депресії, м; q_T - питома фільтраційна витрата через тіло та основу греблі; L_P - розрахункова довжина, м; L - відстань від осі h до нижньої

точки верхового укосу дренажу; ΔL_g - віртуальна ділянка греблі, яка відповідає втратам напору на верховому укосі греблі; ΔL_H - віртуальна ділянка греблі, яка відповідає втратам на верховому укосі дренажу.

Результати теоретичного дослідження положення кривої депресії наведено у табл. 3.

Таблиця 3 - Координати кривої депресії в тілі земляної греблі

x , м	0	10	20	30	40	50	60	66,6
h_x , м								

Криву депресії виправляють візуально в зонах $h_n \geq H_1 - q/k_{zp}$ і $h_n \leq H_2 + q/k_{zp}$.

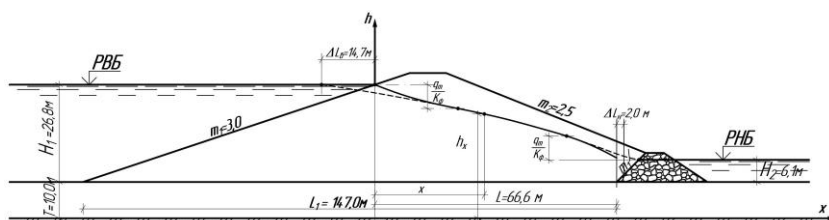


Рис. 3. Схема для побудови кривої депресії теоретичним методом

На основі експериментальних та теоретичних досліджень:

- прийнято масштаб моделі $\lambda = 100$;
- визначено активну фільтраційну зону основи;
- запроектовано ґрунтову модель споруди та основи;
- визначено фільтраційну витрату;
- виконано оцінку похибки при визначенні фільтраційної витрати;
- визначено положення кривої депресії на ґрунтовій моделі;
- визначено теоретичним шляхом координати кривої депресії в тілі земляної греблі.

Лабораторна робота №2 «Дослідження безнапірної фільтрації через земляну греблю на приладі ЕГДА»

1. Мета роботи.

- за допомогою приладу ЕГДА визначити експериментальне положення кривої депресії в тілі моделі земляної греблі і перерахувати її для натурної споруди;
- за допомогою приладу ЕГДА побудувати гідродинамічну сітку руху фільтраційного потоку в тілі моделі греблі;
- використовуючи побудовану гідродинамічну сітку визначити експериментальне значення питомої фільтраційної витрати для моделі і перерахувати її в натуру;
- визначити положення кривої депресії і питому фільтраційну витрату для натурної греблі теоретичним методом і порівняти її з відповідними параметрами, одержаними методом ЕГДА. [1]

2. Основні передумови проведення роботи:

- розглядають плоску задачу руху фільтраційного потоку;
- усталеність руху фільтраційного потоку;
- однорідність області фільтрації.

3. Лабораторна установка.

Лабораторна установка складається з інтегратора ЕГДА – 9/60 та моделі області фільтрації, виконаної з електропровідного паперу за вибраним масштабом. Модель області фільтрації обмежена водопором, лінією верхового укосу греблі, лінією дренажу і кривою депресії. [1] Електричну схему підключення моделі до приладу ЕГДА наведено на рис. 4.

Ошибка! Раздел не указан.

Рис. 4. Схема підключення моделі греблі до приладу ЕГДА

4. Хід виконання роботи.

- для заданої схеми натурної греблі (рис. 5) в масштабі (МІ:100) на електропровідному папері кольоровим олівцем викреслюють модель греблі, а потім вирізають з запасом паперу 2...3 мм в місцях для підключення шин $Ш_1$ і $Ш_2$; [1]

Ошибка! Раздел не указан.

Рис. 5. Схема досліджуваної натурної греблі (розміри в сантиметрах)

- напір H ділять на 10 частин і на моделі кольоровим олівцем проводять горизонтальні лінії через $0,1H$;
- на моделі греблі з електропровідного паперу попередньо підрізають криву депресії, положення якої є явно завищеним в порівнянні з точним її положенням; [1]
- попередньо підрізану модель підключають до приладу ЕГДА;
- встановлюючи дільник напруги на відповідному поділці (через $0,1H$) і щупом на відповідній горизонтальній лінії на моделі знаходять точки, в яких стрілка гальванометра займає нейтральне положення;
- виконують наступне підрізання моделі вже ближче до одержаних точок; [1]
- таким методом послідовних наближень знаходять точки положення кривої депресії. Точне співпадання підрізаної лінії з дійсним положенням кривої депресії буде тоді, коли одночасно будуть виконуватися дві вимоги:
 - а) крива депресії повинна бути граничною лінією течії

$$\left(\frac{dh}{dn} = 0 \right);$$
 - б) ординати кривої депресії змінюються пропорційно напору ($-y=h$).
- Практично виконання цих двох вимог наступить в той момент, коли щуп Щ, поставлений у відповідні точки перетину горизонтальних ліній і підрізаної лінії, дасть нейтральне (нульове) положення стрілки гальванометра G; як правило, знаходження точного положення кривої депресії можливе після 3–4 попередніх підрізань моделі;
- після визначення точного положення кривої депресії за допомогою приладу ЕГДА будують лінії рівних напорів;
- використовуючи властивості гідродинамічної сітки (ортогональність ліній і постійність модуля сітки), лінії течії рекомендується будувати графічним способом;
- характеристики на моделі перераховують в заданому масштабі λ в натурні й заносять в таблиці журналу роботи

(індекс "н" відноситься до натурної споруди, а "м" – до моделі, "е" – експериментальні значення, "т" – теоретичні значення); точками 1–6 на кривій депресії ; [1]

- визначають експериментальне значення питомої фільтраційної витрати q_E^H для натурї по гідродинамічній сітці, для цього із вибраного поясу тиску знімають величини ΔSM , ΔNM , ΔIM , перераховують в натурні і отримують величини,

$$I_i = \frac{\Delta H^H}{\Delta S_i^H}, \quad (8)$$

$$V_i = K_\phi \cdot I_i, \quad (9)$$

$$\Delta q_i^H = V_{ci}^H \cdot \Delta I_i^H, \quad (10)$$

$$q_E^H = \sum \Delta q_i^H. \quad (11)$$

розрахунки виконують в табличній формі (табл. 4.3);

- визначають питому фільтраційну витрату для натурї теоретичним методом,

$$q_T^H = \frac{K_\phi \cdot (H^H)^2}{2L_p^H} \quad (12)$$

$$L_p^H = L^H + \Delta L_\epsilon^H, \quad (13)$$

$$L^H = m_1(H_{xp}^H - H^H) + \epsilon_{xp} + m_2 H_{xp}^H - L_{op}^H; \Delta L_\epsilon^H = 0,4H^H, \quad (14)$$

і порівнюють з експериментальним значенням q_E^H ;

- будують криву депресії для натурної греблі теоретичним методом за формулою

$$h_T^H = \sqrt{2 \frac{q_T^H}{K_\phi} (L^H + \Delta L_{op}^H - X^H)}, \quad (15)$$

$$\Delta L_{op}^H = 0,5 \frac{q_T^H}{K_\phi}, \quad (16)$$

X^H приймають по стрічці 2, табл. 4.2 для відповідних точок 1–6;

- за даними табл. 4.1. викреслюють в стандартному масштабі на міліметровому папері натурну греблю, на яку наносять

гідродинамічну сітку з експериментальною і теоретичною кривими депресії (рис. 6). [1]

За результатами лабораторної роботи роблять висновки про точність теоретичного методу.

Звіт з лабораторної роботи представляють до захисту у вигляді заповненого журналу з прикладеною схемою натурної греблі та нанесеною гідродинамічною сіткою, експериментальною і теоретичною кривими депресії. [1]

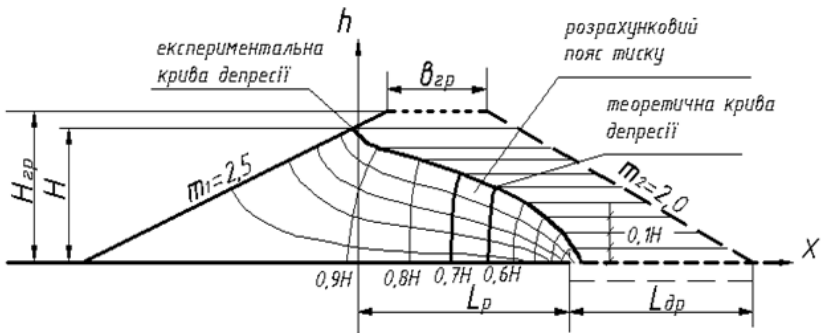


Рис. 6. Гідродинамічна сітка руху фільтраційного потоку в земляній греблі

7 семестр

Лабораторна робота №1 «Дослідження напірної фільтрації під флютбетом відкритого регулятора на ґрунтовій моделі»

Мета роботи:

1. Для заданого відкритого регулятора вибрати масштаб і запроектувати активну фільтраційну зону на ґрунтовій моделі.
2. Визначити параметри напірного руху фільтраційного потоку в основі відкритого регулятора на ґрунтовій моделі.
3. Визначити умови роботи водонепроникної частини флютбету.
4. Визначити за допомогою методу лінійно-контурної фільтрації (ЛКФ) величину діючих напорів на підземний контур відкритого регулятора.

Хід роботи:

1 Вихідні дані:

1.1 На основі геологічних вишукувань визначено основні характеристики ґрунту основи споруди та глибину залягання водоупору:

- ґрунт основи споруди – пісок;
- глибина залягання водоупору $T = 70,0$ м.

1.2 На основі гідравлічного розрахунку для максимального значення витрати:

а) визначено:

- глибину води в НБ $H_2 = 3,0$ м;
- напір $H = 11,0$ м;
- глибину води в ВБ $H_1 = H + H_2 = 14,0$ м;

б) запроектовано конструкцію водобоя (довжина $L_г = 16$ м та товщина плити в межах водозливного порогу $t_г = 3,5$ м, а в межах водобійного колодезя $t_{гк} = 2,5$ м).

в) запроєктовано конструкцію рисберми (довжина кріплення рисберми $L_p = 16$ м, в кінці рисберми влаштовано кам'яну призму $L_k = 3$ м).

1.4 Розміри понуру та корольового шпунту прийнято конструктивно:

- довжина понуру $L_n = (1,5 \div 2,5)H = (1,5 \div 2,5)11 = 26$ м;
- товщина понуру на початку $\delta_n = 0,75$ м, а в кінці $\delta_k = 3,5$ м.
- величина заглиблення корольового шпунта прийнята $S_0 = 14$ м.

Схема прийнятого відкритого регулятора (флютбету) приведена на рис. 7.

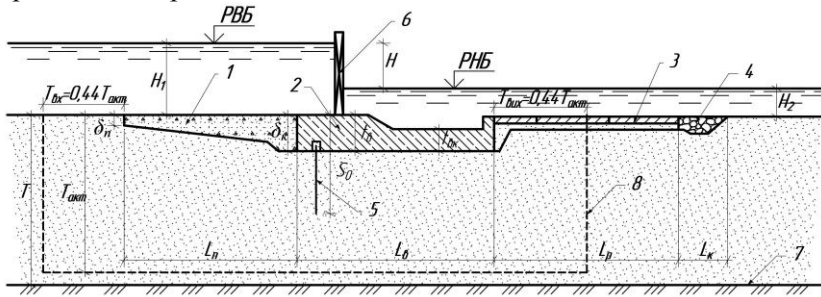


Рис. 7. Схема прийнятого відкритого регулятора: 1 – понур; 2 – поріг водозливу і водобійний колодязь; 3 – рисберма; 4 – кам'яна призма; 5 – корольовий шпунт; 6 – затвор; 7 – водоупор; 8 – активна зона напірної фільтрації

2 Визначення активної зони фільтрації в основі споруди

2.1 Згідно з [1] глибина активної зони фільтрації за напором визначається в залежності від співвідношення l_0/S_0 , де l_0 і S_0 - відповідно горизонтальна та вертикальна проекції водонепроникної частини підземного контуру. В нашому випадку $l_0 = 71$ м і $S_0 = 14$ м.

Згідно з [1] глибина активної зони фільтрації становить

$$T_{акт} = 0,5l_0 \quad (17)$$

2.2 Довжину вхідної та вихідної ділянки активної зони фільтрації визначено за залежністю [1]

$$T_{\text{вх}} = T_{\text{вих}} = 0,44T_{\text{акт}}. \quad (18)$$

Активна зона фільтраційного напірного потоку в основі відкритого регулятора показано на рис. 7 пунктиром.

3 Лабораторні дослідження

3.1 Вибір лінійного масштабу моделі

$$\lambda_{\text{гор}} = \frac{T_{\text{вх}} + l_0 + T_{\text{вих}}}{l_{\text{лотка}}}, \quad (19)$$

$$\lambda_{\text{верт}} = \frac{T_{\text{акт}} + H_1}{h_{\text{лотка}}}, \quad (20)$$

де $l_{\text{лотка}} = 1,04$ м - довжина робочої частини лотка, м;
 $h_{\text{лотка}} = 0,58$ м - висота робочої частини лотка, м.

Приймаємо лінійний масштаб для розмірів моделі та глибин потоку і напорів $\lambda = 100$.

Лінійні розміри моделі та глибин потоку і напорів визначають за рівнянням

$$l_n = \lambda \cdot l_m. \quad (21)$$

3.2 Ґрунт основи споруди при дослідженні фільтраційного потоку не моделюється і прийнято згідно пункту 1.1. Фільтраційна витрата води в основі споруди для натурних умов становить

$$Q_{\text{ф.н.}} = \lambda^2 \cdot V_{\text{ф.м.}} \cdot \omega_{\text{ф.м.}} = \lambda^2 \cdot Q_{\text{ф.м.}}, \quad (22)$$

де $Q_{\text{ф.м.}}$ - витрата фільтраційного потоку в основі споруди моделі; $\omega_{\text{ф.м.}}$ - площа поперечного перерізу фільтраційного потоку.

3.3 Підземний контур споруди виконано з водонепроникного матеріалу (рис. 8).

На рис. 8 приведено схему фільтраційного лотка з моделлю споруди та активної зони фільтрації.

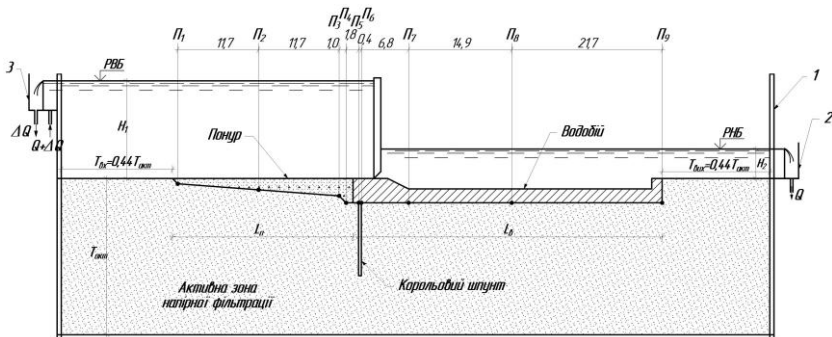


Рис. 8. Схема лабораторної установки для дослідження напірного руху фільтраційного потоку в основі відкритого регулятора: 1 – фільтраційний лотік, 2 – водозлив для контролю рівня води у нижньому б'єфі; 3 - водозлив для контролю рівня води у верхньому б'єфі

3.4 Витрату води, яка проходить в основі споруди, визначено об'ємним способом.

3.5 Обробка експериментальних результатів

3.5.1 Результати досліджень фільтраційної витрати води через основу споруди на моделі наведено в табл. 4.

Таблиця 4 - Визначення фільтраційної витрати води

№ з/п	Об'єм профільтрованої води, W_i , см^3	Час фільтрації t_i , с	Фільтраційна витрата на моделі, $Q_{ф.м.i}$, $\text{см}^3/\text{с}$	Середня фільтраційна витрата на моделі, $\overline{Q}_{ф.м}$, $\text{см}^3/\text{с}$
1.				
2.				
3.				

Фільтраційна витрата для i -го експерименту

$$Q_{ф.м.i} = \frac{W_i}{t_i}, \quad (23)$$

де W_i - об'єм профільтрованої води, см^3 ; t_i - час фільтрації, с.

Середня фільтраційна витрата на моделі

$$\overline{Q_{\phi.m}} = \frac{\sum Q_{\phi.m.i}}{n}, \text{ см}^3/\text{с}.$$

Для оцінки похибки при визначення фільтраційної витрати виконано статистичну обробку.

$$S_{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\phi.m.i} - \overline{Q_{\phi.m}})^2}{f_{\sigma}} \text{ см}^6/\text{с}^2 \quad (24)$$

де f_{σ} - число степенів вільності дисперсії відтворюваності, $f_{\sigma} = n - 1 = 3 - 1 = 2$; n - кількість повторних дослідів.

Похибка при вимірюванні фільтраційної витрати

$$\Delta Q_{\phi.m} = \pm \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{n}} t_{1-p/2}, \text{ см}^3/\text{с} \quad (25)$$

де t - квантиль розподілу Стьюдента (при $f_{\sigma} = 2$ становить $t_{1-p/2} = 4,3$); p - довірча імовірність, $p = 95\%$.

Тоді фільтраційна витрата через основу споруди на моделі

$$Q_{\phi.m} = \overline{Q_{\phi.m}} \pm \Delta Q_{\phi.m}, \text{ см}^3/\text{с},$$

а для натурних умов середня фільтраційна витрата через основу відкритого регулятора для натурних умов

$$Q_{\phi.n} = \lambda^2 \overline{Q_{\phi.m}} \pm \lambda^2 \Delta Q_{\phi.m}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

3.5.2 Значення параметрів напірної фільтрації від діючого напору на моделі (рис. 8) наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Експериментальні значення параметрів фільтраційного потоку

№ з / п	Параметри фільтраційного потоку	Поч. флюп бету	Номери п'езометрів											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Відлік рівня води в п'езометрах на моделі, Π_i , см													
2	Величина діючих фільтраційних напорів на моделі, $h_{\phi.m.i}$, см													

3	Величина діючих фільтраційних напорів для натурних умов, $h_{\phi ni}$, м																			
4	Відстань вздовж водонепроникного розгорнутого контуру фільтрації для натурних умов від початку флютбету (точка 1) до точки розташування i -го п'єзометра, l_{1-i} , (м)																			
5	Величина діючих фільтраційних напорів для натурних умов за методом ЛКФ, $h_{\phi ni}^{LK\Phi}$, м																			
6	Величина абсолютної похибки методу ЛКФ, $\Delta h_{\phi ni}^{LK\Phi}$																			
	Номери ділянок між п'єзометрами	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9										
7	Відстань між п'єзометрами на моделі для натурних умов), $l_{n-(n+1)}$, см (м)																			
8	Величина діючих градієнтів, I_c																			

Величину діючих фільтраційних напорів на моделі ($h_{\phi mi}$, см) на підшву водонепроникної частини флютбету в точках розташування п'єзометрів визначено за залежністю

$$h_{\phi mi} = \Pi_i - H_2. \quad (26)$$

Величину діючих фільтраційних напорів на підшву водонепроникної частини флютбету для натурних умов в точках розташування п'єзометрів ($h_{\phi ni}$, м) визначено за залежністю

$$h_{\phi ni} = \lambda \cdot h_{\phi mi} = 100 \cdot h_{\phi mi}. \quad (27)$$

Епюри фільтраційних напорів для натурних умов, які визначені експериментальним шляхом за допомогою ґрунтової моделі приведено на рис. 8.

Величина діючих градієнтів для моделі і натурних умов на розглянутих ділянках визначається за залежністю

$$I_c = (\Pi_n - \Pi_{n+1}) / l_{n-(n+1)} \quad (28)$$

3.5.3 Перевірка умов роботи елементів флютбету полягає у наступному:

- понуру - у визначенні товщини понура із умови стійкості його проти суфозії від діючого градієнта фільтрації;

- водобою - із умови протидії його ваги зваженому фільтраційному тиску.

Товщина понуру

$$\delta \geq \frac{H - h_{\phi ni}}{I_n}. \quad (29)$$

де I_n - допустимий градієнт фільтрації для ґрунту понура (глина 4-6, суглинки 3-4). У нашому випадку понур виконано з глини.

Мінімальна розрахункова товщина понура

- на початку

(менше прийнятої товщини $\delta_n = 0,75$ м);

- в кінці

(менше прийнятої товщини $\delta_k = 2,5$ м).

Товщина водобою визначається за залежністю

$$t_g = \frac{h_{\phi ni}}{\frac{\rho_b}{\rho} - 1} \gamma_s. \quad (30)$$

де ρ_b - густина бетону, $\rho_b = 2,4$ т/м³; γ_s - коефіцієнт запасу, $\gamma_s = 1,05$.

В нашому випадку мінімальна розрахункова товщина водобою в найбільш небезпечному перерізі (точка 8 – мінімальна товщина водобою при максимальному діючому зваженому фільтраційному тиску) становить

$$t_g = \frac{h_{\phi n8}}{\frac{\rho_b}{\rho} - 1} \gamma_s.$$

Лабораторна робота №2 «Дослідження напірної фільтрації під флютбетом відкритого регулятора на приладі ЕГДА»

1. Мета роботи.

- ознайомитись з принципом дії приладу електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА);
- запроєктувати електричну модель розрахункової області фільтрації;
- за допомогою приладу ЕГДА побудувати гідродинамічну сітку руху фільтраційного потоку під флютбетом гідротехнічної споруди;
- використовуючи побудовану гідродинамічну сітку побудувати:
 - а) епюру фільтраційних напорів на лінії підземного контуру флютбета;
 - б) епюру вихідних градієнтів;
 - в) епюру вихідних швидкостей;
 - г) інтегральну криву питомих витрат і визначити питому фільтраційну витрату під флютбетом.

2. Основні передумови моделювання напірної фільтрації на приладі ЕГДА.

- розглядається плоска задача руху фільтраційного потоку;
- область фільтрації однорідна ($k=\text{const}$);
- елементи флютбета водонепроникні;
- рух фільтраційного потоку усталений і безперервний;
- використовується математична аналогія між законами, що описують фільтраційний потік в ґрунті і електричний струм в плоскому провіднику;
- геометрична подібність природи і моделі;
- фізична подібність, тобто коефіцієнти електропровідності моделі повинні бути пропорційними коефіцієнту фільтрації ґрунту основи натурної споруди;
- динамічна подібність, тобто граничні умови для моделі і природи повинні бути подібні.

3. Лабораторна установка.

Лабораторна установка складається з інтегратора ЕГДА – 9/60 та моделі області фільтрації, виконаної з електропровідного паперу за вибраним масштабом.

Електричну схему прилада ЕГДА наведено на рис. 9.

4. Порядок виконання роботи.

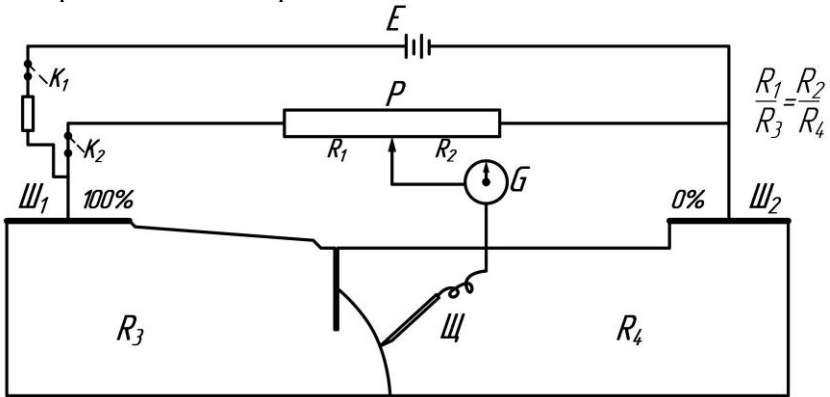


Рис. 9. Електрична схема приладу ЕГДА: E – джерело струму, P – реостат,

G – гальванометр, \mathcal{W} – щуп, $\mathcal{W}_1, \mathcal{W}_2$ – шини для підключення моделі до приладу ЕГДА, R_1 – опір електропровідного паперу від шини \mathcal{W}_1 до точки прикладення щупа, R_2 – опір електропровідного паперу від точки прикладення щупа до шини \mathcal{W}_2

Хід роботи.

1. Для заданої активної зони фільтрації відкритого регулятора вибираємо лінійний масштаб електричної моделі ґрунту, виходячи із розмірів електропровідного паперу, який є в наявності.

Розрахунок масштабу моделі

$$\lambda_{верт} = \frac{T_{вх} + I_0 + T_{вих}}{l_{листка}}, \quad \lambda = \lambda_{гор} = \lambda_{верт} = 200$$

2. Виготовляємо електричну модель активної зони фільтрації №1 і за допомогою інтегратора ЕГДА будемо лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,1H$, які моделюють лінії рівного напору та визначаємо в точках розташування п'єзометрів відсоткове значення діючого напору.

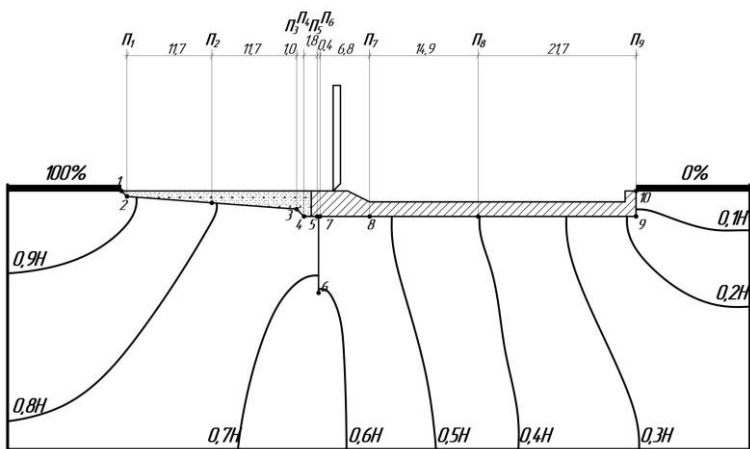


Рис. 10. Електрична модель активної зони фільтрації №1 (лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,1H$, які моделюють лінії рівного напору)

3. Виготовляємо електричну модель активної зони фільтрації №2 і за допомогою інтегратора ЕГДА будуюмо лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,2q$, які моделюють лінії току.

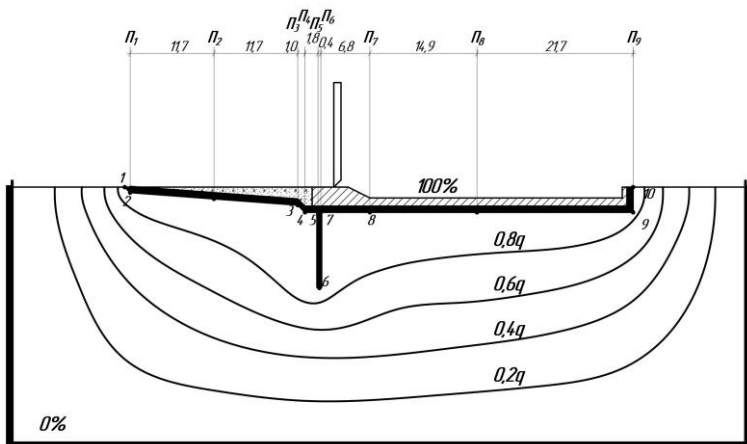


Рис. 11. Електрична модель активної зони фільтрації №2 (лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,2q$, які моделюють лінії току)

4. Будуємо гідродинамічну сітку шляхом перенесення отриманих ліній току з моделі №2 на модель №1, або ліній рівного напору - з моделі №1 на модель №2.

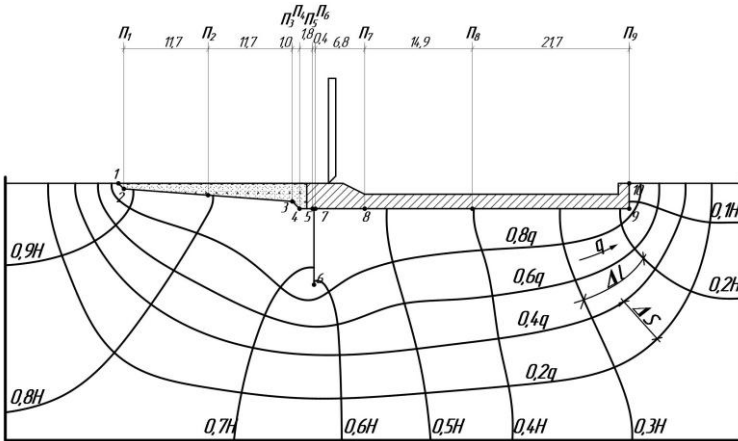


Рис. 12. Гідродинамічна сітка руху фільтраційного потоку під флютбетом відкритого регулятора

5. Вздовж кожної лінії току гідродинамічної сітки визначаємо середні вихідні градієнти та швидкість фільтраційного потоку і будуємо відповідні графіки $I_{вих} = f(x)$, $V_{вих} = f(x)$. Розрахунок вихідних градієнтів виконуємо в таблиці.

Таблиця 6 - Розрахунок вихідних градієнтів $I_{вих}$

Номер лінії току	0	1	2	3	4	5
Довжина лінії току ΔS_i^H						
Вихідний градієнт $I_{вих}$						
Швидкість фільтрації $V_{вих}$						

Вихідний градієнт $I_{вих}$ визначається за залежністю

$$I_{вих} = \Delta H^H / \Delta S_i^H,$$

де ΔH^H – втрата напору фільтраційного потоку по довжині лінії течії ΔS_i^H в межах останнього поясу тиску.

Швидкість фільтрації $V_{вих}$ визначається за залежністю

$$V_{\text{вих}} = K_{\phi} \cdot I$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації ґрунту основи ($K_{\phi} = 50$ м/добу).

6. Порівнюємо значення отриманих середніх вихідних градієнтів $I_{\text{вих}}$ з критичним контролюючим градієнтом напору $I_{cr,m}$ для ґрунту основи. Робимо висновок про можливість фільтраційних деформацій ґрунту основи і правильність конструктивних рішень підземного контуру споруди.

7. Для кожної стрічки гідродинамічної сітки визначаємо питомі витрати Δq_i^H та будуємо інтегральну криву питомої витрати $q = f(x)$. Розрахунок ведемо в таблиці.

Таблиця 7 - Розрахунок питомих витрат q_i

Номера ліній току	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
Середня ширина вихідного поясу тиску Δl_i^H					
Середня швидкість в межах вихідного тиску V_{ci}					
Питома витрата q_i^H					

Витрату через відповідну стрічку витрати визначають за залежністю

$$q_i^H = V_{ci} \cdot \Delta l_i^H,$$

де V_{ci} – середня швидкість на відповідній стрічці витрати, Δl_i^H – ширина на виході відповідної стрічки витрати.

8.3 допомогою ліній рівного електричного потенціалу, та потенціалу в точках розташування п'єзометрів визначаємо величину діючого напору.

Визначення фільтраційних напорів

За допомогою приладу ЕГДА в точках розташування п'єзометрів визначаємо величину електричного потенціалу

Таблиця 8 - Розрахунок діючих напорів

№ з/п	Параметри	Початок флюотбету	Номери п'езометрів										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1.	Величина електричного потенціалу, %	100											
2.	Величина діючих фільтраційних напорів, м												

9. Будуємо суміщену епюру фільтраційного напору на підземний контур.

10. Порівнюємо отриману епюру з побудованою за результатами експериментальних досліджень за допомогою ґрунтової моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лабораторний практикум з гідротехнічних споруд: навч. пос. М.М. Хлапук, О.Є. Щодро, Ніколайчук О.М., та ін. Рівне : НУВГП, 2016. 105 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/8228/>
2. Силабус навчальної дисципліни «Гідротехнічні споруди» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, які навчаються за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології», спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології». Рівне : НУВГП, 2024. 14 с. 01-04-52S.
3. Гідротехнічні споруди : навч. посіб. / М. М. Хлапук, Л. А. Шинкарук, А. В. Дем'янюк, О. А. Дмитрієва. Рівне : НУВГП, 2013. 241 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/1758/>
4. Гідротехнічні водозабірні споруди : навчальний посібник / С. В. Величко, О. В. Дупляк та ін. К., 2023. 256 с.