

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки

02/03-03М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни

«Гідротехнічні споруди енергетичних об'єктів і систем»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Гідроенергетика»
спеціальності 145 «Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика»
всіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з якості
ННІЕАВГ
протокол № 2 від 13.10.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Гідротехнічні споруди енергетичних об'єктів і систем» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика» всіх форм навчання. [Електронне видання] / Корнійчук В. І., Волк Л. Р., Мельничук І. М. – Рівне : НУВГП, 2025. – 26 с.

Укладачі: **Корнійчук В. І.** к.т.н., доцент кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки; **Волк Л. Р.**, к.т.н., доцент, в.о. завідувача 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 145 «Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика», к.т.н., доцент кафедри енергетики

О. О. Галич

Попередня версія методичних вказівок 01-04-90М.

© В. І. Корнійчук,
Л. Р. Волк,
І. М. Мельничук, 2025
© НУВГП, 2025

Зміст

Вступ	3
Загальний порядок і правила виконання лабораторних робіт	4
Основні правила техніки безпеки під час виконання лабораторних робіт	4
1. Лабораторна робота №1. Дослідження напірної фільтрації під флютбетом відкритого регулятора на ґрунтовій моделі.....	6
2. Лабораторна робота №2. Дослідження безнапірної фільтрації через однорідну земляну греблю на ґрунтовій моделі.....	10
3. Лабораторна робота №3. Дослідження напірної фільтрації під флютбетом відкритого регулятора на приладі ЕГДА.....	14
4. Лабораторна робота №4. Дослідження безнапірної фільтрації в тілі земляної греблі на приладі ЕГДА	22
Рекомендована література	26

Вступ

Навчальна дисципліна “Гідротехнічні споруди енергетичних об’єктів і систем” входить до циклу дисциплін фундаментальної підготовки здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності «Гідроенергетика» і є важливою складовою підготовки фахівців.

Предметом навчальної дисципліни є набуття студентами теоретичних знань та практичних навичок з питань проектування, будівництва, експлуатації і досліджень гідротехнічних споруд для розв’язання різноманітних задач енергетичних комплексів та раціонального використання водних ресурсів. Дисципліна ознайомлює студентів із принципами конструювання гідротехнічних споруд різного призначення та базовими принципами та методиками їх розрахунків. Програмою дисципліни передбачено курсове проектування, під час виконання якого студент повинен засвоїти методику розрахунків гідротехнічних споруд та набути навички інженерного пошуку при виборі оптимального варіанту цих споруд.

Основною метою викладання дисципліни “Гідротехнічні споруди енергетичних об’єктів і систем” є формування у майбутніх фахівців-гідроенергетиків умінь і знань сучасних методів щодо проектування, будівництва та експлуатації гідротехнічних споруд, які є обов'язковими при створенні енергетичних об'єктів і систем, оскільки такі об'єкти під час експлуатації потребують значної витрати води, а це пов'язано із створенням водосховищ і значної кількості різноманітних гідротехнічних споруд, які будуть забезпечувати нормальну і надійну роботу таких водосховищ і енергетичних об'єктів в цілому.

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 електроцитів, 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 огороженням;

3.5. Ходити без дозволу викладача та завідувача лабораторії по лабораторним установах та самостійно чіпати елементи лабораторних установок;

3.6. Знаходитися у верхньому одязі в аудиторіях не дозволяється. Всі повинні суворо дотримуватися норм промсанітарії та пожежної безпеки.

Виконання робіт організовують 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

1. Лабораторна робота №1.

Дослідження напірної фільтрації під флютбетом відкритого регулятора на ґрунтовій моделі

Фільтраційний розрахунок дозволяє визначити умови руху потоку в районі споруди, вплив форм і розмірів споруди на потік а також назначити розміри підземного контуру, які забезпечують стійкість споруди.

Під час дослідження фільтрації користуються усередненими характеристиками: швидкістю фільтрації, п'єзометричним тиском і витратою фільтраційного потоку, які відносяться до площі за розмірами більших ніж розміри пор, в яких рухається фільтраційний потік.

Фільтрація проходить в ґрунтових масивах. За відношенням до водопроникності ґрунти розділяють на водопроникні і водонепроникні – водоупори.

Водопроникність ґрунтів не являється абсолютною характеристикою і, як правило, її оцінюють за відношенням до сусідніх, більш водопроникних ґрунтів. Водопроникні ґрунти бувають однорідними і неоднорідними.

В ґрунтах вода знаходиться у вигляді пари, зв'язаної, капілярної і у вигляді вільної, або гравітаційної води. В гідротехнічній практиці в більшій мірі цікавляться гравітаційною і капілярною водою. Ґрунт, який заповнено водою, що фільтрує, називається областю фільтрації.

Фільтраційний потік вважають фіктивним потоком, який заповнює весь об'єм, зайнятий ґрунтом в досліджуваній області. При цьому витрата фіктивного потоку через довільно вибрану площу дорівнює витраті реального потоку, тиск дорівнює тиску реального потоку тощо. Середня швидкість руху фільтраційного потоку називається швидкістю фільтрації. Середня швидкість фільтрації завжди менша середньої швидкості води в порах. Фільтрація може бути усталеною і неусталеною. Як приклад неусталеної фільтрації може бути фільтрація в земляній греблі під час наповнення або спорожнення водосховища.

Фільтрацію розділяють на напірну і безнапірну (вільну). При напірній фільтрації вода проникає в усі пори ґрунту під спорудою і рух її подібний до напірного руху потоку в трубах. Під флютбетом споруд (гребель, шлюзів тощо) фільтрація напірна.

Мета роботи:

1. за допомогою п'єзометрів на моделі визначити ординати фільтраційних напорів, побудувати експериментальну епюру фільтраційних напорів на лінії підземного контуру;
2. за методом лінійної контурної фільтрації (ЛКФ) для натурної споруди побудувати теоретичну епюру фільтраційних напорів на лінії підземного

- контуру флютбету і порівняти її з раніше побудованою експериментальною епюрою;
- експериментальним шляхом визначити значення питомої фільтраційної витрати на моделі;
 - визначити за результатами експерименту коефіцієнт фільтрації ґрунту основи флютбету K_f і за його значенням із довідкової технічної літератури зробити висновок щодо виду цього ґрунту.

1. Основні умови моделювання напірної фільтрації на ґрунтових моделях:

- геометрична подібність моделі і натурної споруди;
- однорідність області фільтрації;
- усталеність руху фільтраційного потоку;
- водонепроникність елементів флютбету.

2. Лабораторна установка

Схему лабораторної установки наведено на рис. 1.1. Модель флютбету побудовано в плоскому лотку з скляними боковими стінками. Для визначення ординат фільтраційних напорів на моделі встановлено п'єзометри з скляних трубок, нижні кінці яких розташовано на лінії підземного контуру.

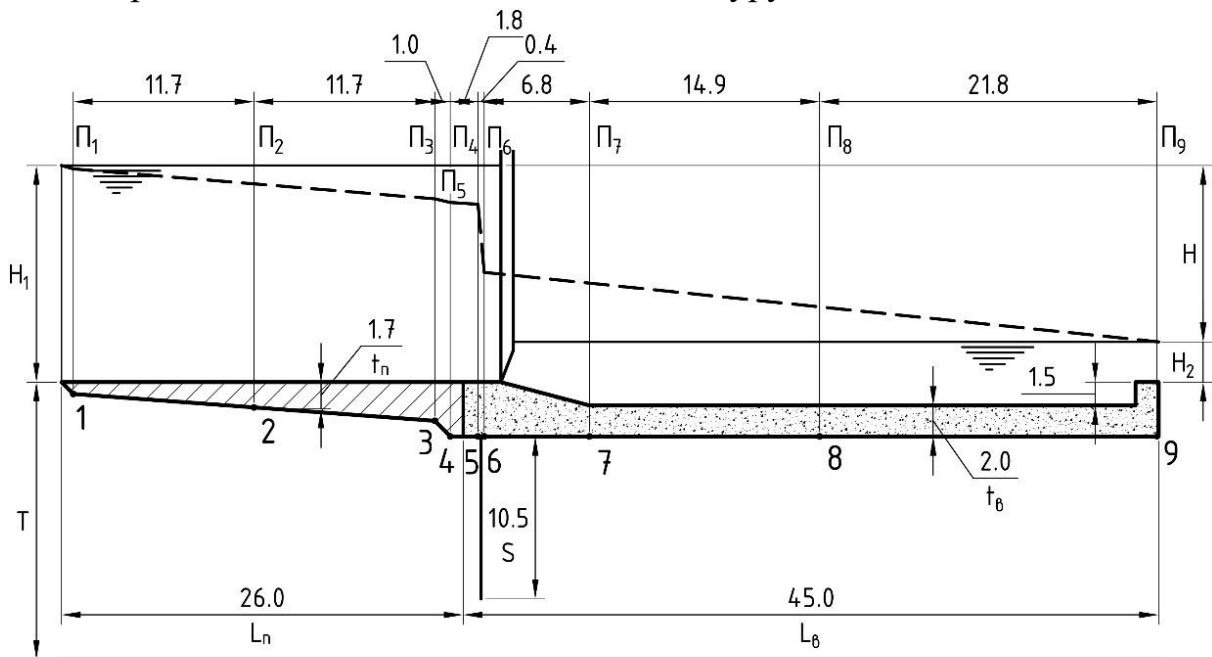


Рисунок 1.1 – Схема підземного контуру відкритого регулятора

3. Порядок виконання лабораторної роботи

- вимірюють основні розміри моделі флютбету і заносять в таблицю журналу роботи;

- за допомогою бачків B_1 і B_2 встановлюють задані рівні води в верхньому і нижньому б'єфах і після усталення руху фільтраційного потоку вимірюють глибини H_1 і H_2 і заносять в журнал;
- вимірюють глибини води в п'єзометрах Π_i відносно відмітки дна нижнього б'єфу і заносять в журнал;
- за допомогою мензурки і секундоміра на виході з зливного бачка B_2 виконують трьохразове замірювання фільтраційної витрати і результати заносять в журнал.

4. Обробка результатів дослідів

- виконують розрахунок експериментальних ординат фільтраційних напорів

$$h_E^M = \Pi_i - H_2^M \quad (1.1)$$

- за розмірами викреслюють на міліметровому папері з нанесенням осей п'єзометрів повздовжній розріз дослідного флютбету;
- за ординатами фільтраційних напорів будують експериментальну епюру фільтраційних напорів;
- методом ЛКФ будують теоретичну епюру фільтраційних напорів і порівнюють з експериментальною; теоретичні ординати вираховують за залежністю

$$h_T = X \cdot H/L \quad (1.2)$$

де X – відстань від останньої точки підземного контуру флютбету до відповідної точки на лінії підземного контуру;

L – довжина підземного контуру флютбету;

H – напір на натурну споруду.

- визначають значення питомої фільтраційної витрати на моделі q_E^M за залежностями:

$$Q_i = W_i/t_i \quad (1.3)$$

де Q_i – фільтраційна витрата на моделі, $\text{см}^3/\text{с}$;

W_i – об'єм профільтрованої води, см^3 ;

t_i – час фільтрації, с ;

$$Q_C = \sum_{i=1}^n Q_i/n \quad (1.4)$$

де Q_C – середня фільтраційна витрата $\text{см}^3/\text{с}$;

n – кількість повторно проведених дослідів, $n=3$.

$$q_E = Q_C/b \quad (1.5)$$

- визначають значення коефіцієнта фільтрації ґрунту основи флютбета за формулою Дарсі:

$$K_{\phi} = V_C / I_C \quad (1.6)$$

де V_C – середня швидкість фільтрації;

I_C – середній градієнт напору

$$V_C = q_E^M / T_{5-7}^M \quad (1.7)$$

де T_{5-7}^M – середня товщина водопроникного шару під флютбетом відкритого регулятора між п'єзометрами № 5 і № 7;

$$T_{5-7}^M = T^M - t_b^M \quad (1.8)$$

$$I_C = (\Pi_5 - \Pi_7) / l_{5-7}^M \quad (1.9)$$

де Π_5, Π_7 – ординати фільтраційних напорів в п'єзометрах № 5 і № 7;

l_{5-7}^M – відстань між п'єзометрами № 5 і № 7;

- за значенням коефіцієнта фільтрації K_{ϕ} , користуючись довідковою технічною літературою, робляться висновки щодо виду ґрунту основи флютбета (табл. 1.1).

За результатами дослідів лабораторної роботи необхідно привести висновки про точність методу ЛКФ і про назву ґрунту основи флютбета.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти фільтрації ґрунтів

Вид ґрунту	Коефіцієнт фільтрації, K_{ϕ} , см/с
Гравій	$10^{-2} - 10^{-1}$
Пісок крупний	$10^{-2} - 10^{-1}$
Пісок дрібний	$10^{-3} - 10^{-2}$
Супісок	$10^{-5} - 10^{-4}$
Суглинок	$10^{-7} - 10^{-5}$

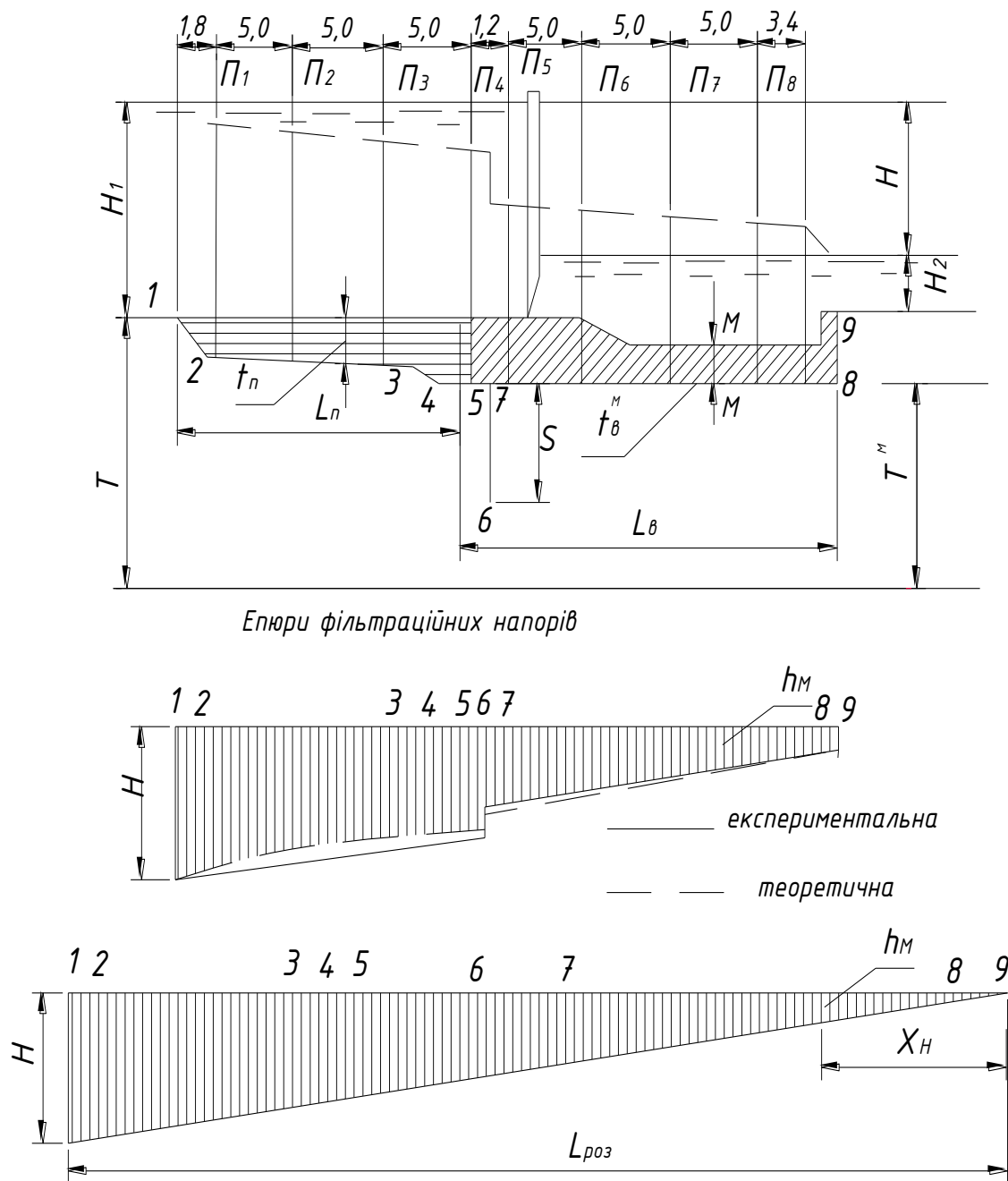


Рисунок 1.2 – Схема підземного контуру відкритого регулятора

2. Лабораторна робота №2.

Дослідження безнапірної фільтрації

через однорідну земляну греблю на ґрунтовій моделі

Під дією напору H , який створює гребля, виникає рух фільтраційного потоку з верхнього б'єфа в нижній через тіло греблі і основу, якщо вона водопроникна. Рух ґрунтового потоку в тілі греблі буде безнапірним, тому що він обмежений зверху вільною поверхнею, на якій у всіх точках тиск дорівнює атмосферному. Вільна поверхня фільтраційного потоку називається поверхнею депресії, а лінія перетину

цієї поверхні з вертикальною площиною депресійною кривою або кривою депресії. Нижче поверхні депресії ґрунт насичений водою, а вище неї знаходиться зона капілярного підняття води. Висота капілярного підняття над кривою депресії залежить від складу ґрунту. Вище капілярної зони ґрунт знаходиться в умовах природної вологості, яка залежить від кліматичних умов району.

Фільтрація води через ґрунтові греблі відіграє дуже важливу роль. Статистика показує, що більше 50% аварій ґрунтових гребель виникли як наслідок фільтраційних деформацій в тілі греблі. Тому при проектуванні ґрунтових гребель необхідно проводити фільтраційний розрахунок, в процесі якого визначаються:

- положення депресійної поверхні фільтраційного потоку в тілі греблі;
- фільтраційна витрата;
- напори (або градієнти фільтраційного напору) у відповідних частинах тіла греблі.

Мета роботи:

- визначити експериментальним шляхом положення кривої депресії на ґрунтовій моделі;
- побудувати криву депресії в тілі земляної греблі теоретичним шляхом і порівняти її з експериментальною;
- визначити експериментальним шляхом питому фільтраційну витрату на ґрунтовій моделі, перерахувати її в натуру і порівняти з питомою фільтраційною витратою знайденою теоретичним методом для натурної греблі;
- визначити дослідним шляхом коефіцієнт фільтрації ґрунту моделі.

1. Лабораторна установка

Ґрунтова модель греблі розташована в плоскому лотку із скляними стінками (рис. 2.1).

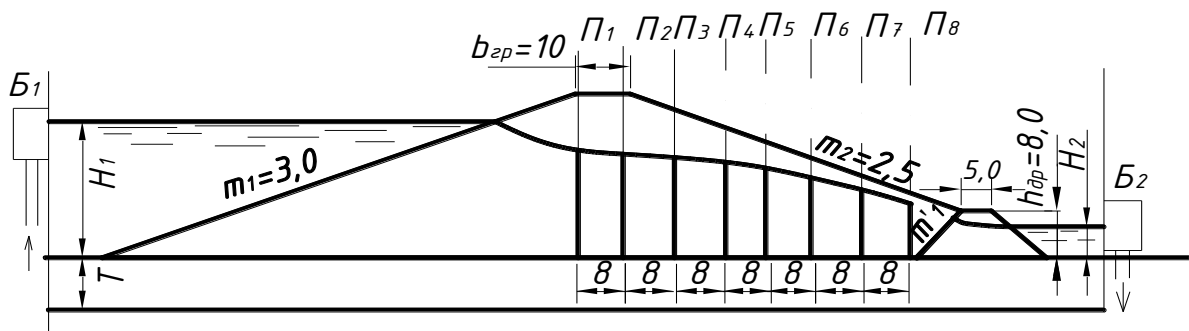


Рисунок 2.1 – Схема до розрахунку фільтрації через однорідну греблю

Подачу і регулювання рівня води в верхньому б'єфі здійснюють за допомогою

бачка **Б₁**. Відвід профільтрованої води і регулювання рівня води в нижньому б'єфі виконують за допомогою зливного бачка **Б₂**. Для визначення положення кривої депресії на моделі встановлено п'єзометри.

2. Порядок виконання роботи

- виміряють основні розміри моделі греблі і заносять в журналу роботи;
- за допомогою бачків **Б₁** і **Б₂** встановлюють задані рівні води верхнього і нижнього б'єфів, вимірюють глибини H_1 і H_2 ;
- після усталення режиму фільтрації виміряють ординати кривої депресії на моделі h_E (відносно відмітки водоупору) і записують в журнал;
- вимірюють значення фільтраційної витрати Q_1 , Q_2 , Q_3 об'ємним способом (з допомогою мензурки та секундоміра) і записують в журнал.

3. Обробка результатів дослідів

- будуємо криву депресії за даними п'єзометрів (рис. 2.2);

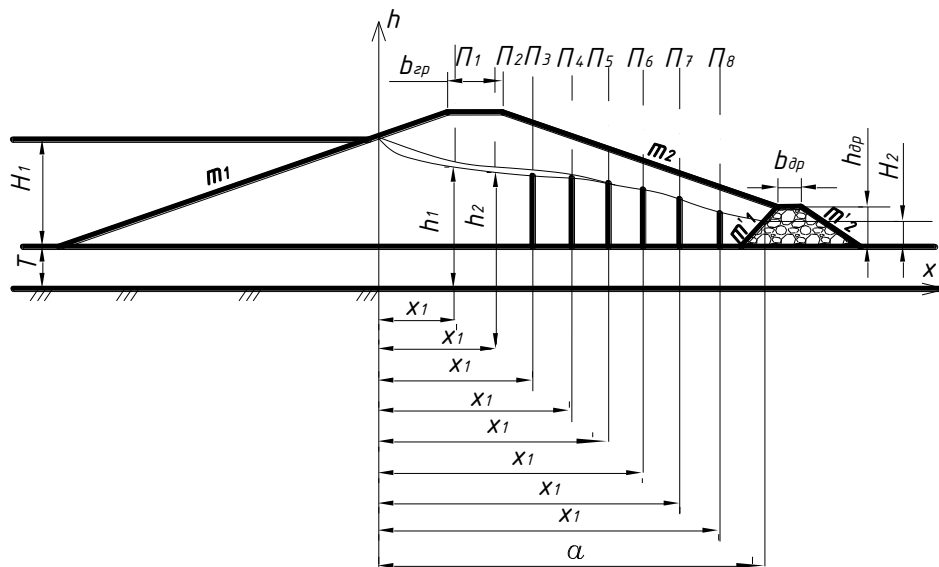


Рисунок 2.2 – Схема до розрахунку фільтрації через однорідну греблю

- знаходимо величину середньої фільтраційної витрати

$$Q_c = \frac{1}{3}(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad (2.1)$$

- знаходимо питому фільтраційну витрати

$$q_e = \frac{Q}{B} \quad (2.2)$$

- знаходимо теоретичне положення кривої депресії за схемою греблі з дренажним банкетом на водопроникній основі, наведеної на рис. 2.3

3. Лабораторна робота №3. Дослідження напірної фільтрації під флутбетом відкритого регулятора на приладі ЕГДА

Лабораторні дослідження методом електрогідродинамічних аналогій (ЕГДА).

Часто різні фізичні явища можуть бути виражені одними і тими ж диференціальними рівняннями і це дає змогу провести математичну аналогію між різними процесами. Прикладом цього можуть бути електричний струм і фільтрація рідини.

Метод електрогідродинамічних аналогій, або скорочено ЕГДА оснований на електричному моделюванні руху ґрунтового потоку, що дозволяє дослідити фільтрацію під основами гідротехнічних споруд, в земляних греблях, каналах, дамбах.

В площині проходження електричного струму і в площині фільтрації, яка підкоряється закону Дарсі, виділимо елементарні струминки течії і проведемо аналогію між електричним струмом і фільтрацією рідини (рис. 3.1). Виділяючи елементарні ділянки dl можна записати:

а) для електричного поля за законом Ома

$$i = -c \frac{du}{dl} \quad (3.1)$$

де i – сила струму; c – коефіцієнт електропровідності; u – електричний потенціал.

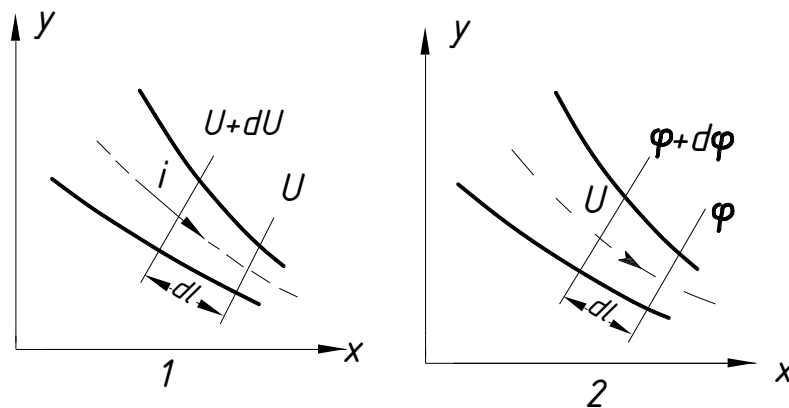


Рисунок 3.1 – Елементарна трубка току: 1 – область електричного поля; 2 – область фільтраційного потоку

б) для фільтраційного потоку за законом Дарсі

$$V = -k \frac{dh}{dl} = \frac{\partial \phi}{\partial l} \quad (3.2)$$

де V – швидкість фільтрації; ϕ – потенціал швидкості; k – коефіцієнт фільтрації; h – напір.

Проекції вектора сили струму i на осі координат:

$$i_x = -c \frac{\partial u}{\partial x}; \quad i_y = -c \frac{\partial u}{\partial y}; \quad i_z = -c \frac{\partial u}{\partial z}; \quad (3.3)$$

проекції вектора швидкості V на відповідні осі:

$$V_x = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad V_y = -k \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial y}; \quad V_z = -k \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z}. \quad (3.4)$$

За законом Кірхгофа рівняння нерозривності електричного струму

$$\frac{\partial i_x}{\partial x} + \frac{\partial i_y}{\partial y} + \frac{\partial i_z}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

або після відповідної підстановки отримаємо

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (3.6)$$

Відомо, що і фільтраційний потік теж задовольняє умові нерозривності і рівняння має вигляд

$$\frac{\partial h_x}{\partial x} + \frac{\partial h_y}{\partial y} + \frac{\partial h_z}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Якщо записати рівняння нерозривності через потенціал швидкості, то отримаємо

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (3.8)$$

Аналізуючи рівняння (3.6), (3.7), (3.8), можна прийти до висновку, що напір h , потенціал швидкості ϕ і електричний потенціал u задовольняють рівнянню Лапласа, являються гармонічними функціями координат. Отже, для геометрично подібних областей при однакових граничних умовах, при незмінній електропровідності середовища і водопроникності ґрунту інтеграли рівнянь будуть відрізнятися довільними постійними.

Така аналогія дає можливість на моделі, яка виконана з електропровідного матеріалу і геометрично подібна області фільтрації, яку досліджують, знаходити точки з однаковими значеннями потенціалів, що будуть відповідати лініям рівних напорів, а перпендикулярні до них лінії – силовим лініям і лініям течії фільтраційного потоку.

Отримуючи на електричній моделі числові значення електричного потенціалу u , можна визначити числові значення напору h або потенціалу швидкості ϕ у відповідних точках. Для одержання фільтраційної витрати на моделі необхідно отримати числові значення густини струму i (табл. 3.1)

При вивченні руху ґрунтового потоку необхідні і достатні умови подібності зводяться до наступних:

- 1) електрична модель повинна бути геометрично подібна натурі або інакше представляти область фільтрації в будь-якому масштабі;
- 2) коефіцієнти електропровідності моделі повинні бути пропорціональні відповідним коефіцієнтам фільтрації – умова фізичної подібності;
- 3) граничні умови місця входу і виходу потоку для моделі і натури повинні бути подібні – динамічна подібність.

Таблиця 3.1 – Елементи електричного струму і відповідні їм елементи фільтраційного потоку

Електричний струм	Фільтраційний потік
Електричний потенціал u	Гідростатичний напір h
Закон Ома $i = -c \frac{du}{dl}$	Закон Дарсі $V = -k \frac{dh}{dl}$
Рівняння Лапласа для електричного потенціалу $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$	Рівняння Лапласа для напору $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$
Еквіпотенціальна поверхня $u = const$	Поверхня рівних напорів $h = const$
Густина струму I	Фільтраційна витрата Q
Коефіцієнт електропровідності ρ	Коефіцієнт фільтрації k

Прилад ЕГДА і принцип його роботи

Електрична схема приладу ЕГДА складається з двох елементів – джерела живлення і вимірювального кола.

Вимірювальне коло складається з розподільника напруги, гальванометра, який фіксує відсутність електричного струму і голки для фіксації шуканих точок на моделі.

Градуирований реохорд з відповідними поділками необхідний як подільник напруги. Вимірювальне коло зібране за мостовою схемою (рис. 3.2).

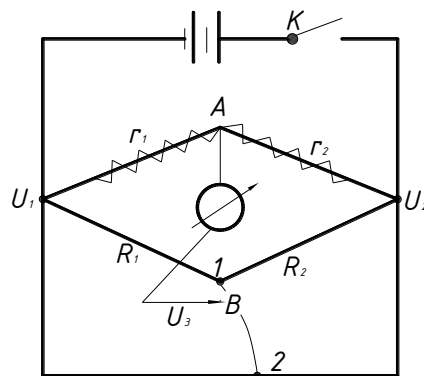


Рисунок 3.2 – Схема моста опоры

Робота мостової схеми зводиться до того, що при виконанні співвідношення опорів $\frac{r_1}{r_2} = \frac{R_1}{R_2}$ буде рівність потенціалів в точках А і В, і між цими точками буде відсутній струм – стрілка гальванометра займе нейтральне положення. Залишаючи постійним положення подільника напруги, можна одержати лінію еквіпотенціала

1–2, яка відповідає лінії рівних напорів. Перевага моста опору в тому, що результати вимірювання потенціалів не залежать від величини напруги, прикладеної у вершинах моста. Ця особливість схеми дозволяє приймати різницю потенціалів $U_1 - U_2$ за одиницю. Розбивши реохорд на рівні частини (як правило, на 10) є можливість на моделі знайти еквіпотенціали, які відповідають лініям рівних напорів, визначати їх в долях від повного напору.

Для того, щоб отримати лінії рівних напорів необхідно шини III_1 і III_2 розташувати на поверхні ґрунтів у верхньому і нижньому б'єфах моделі, а для того, щоб отримати лінії течії шини III_1 і III_2 розташувати на водонепроникній частині контуру і на межі водоупору (рис. 3.4)

Для знаходження ліній рівних напорів показник напруги розташовується на шуканій величині долі напору, в яких повинна бути витримана умова $\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}$. Всі шукані точки повинні бути розташовані на одній еквіпотенціалі. Кількість точок вибирають з такої умови, щоб по ним можна було побудувати еквіпотенціаль. Закінчивши заміри на одній еквіпотенціалі, переходять до замірів на наступній. Послідовно переставляючи стрілку показника напруги з поділки на поділку, знаходять відповідні їм еквіпотенціали.

Лінії течії знаходяться в такій же послідовності, як і еквіпотенціали. Якщо можливо досить легко закріпити шини відповідно до підземного контуру споруди, то шини розташовують замість підземного контуру і водоупору. Але частіше всього на основі отриманих ліній рівних напорів лінії течії будують графічно. Для цього попередньо вибирають таку кількість ліній течій, щоб утворити криволінійні квадрати або прямокутники (рис. 3.3).

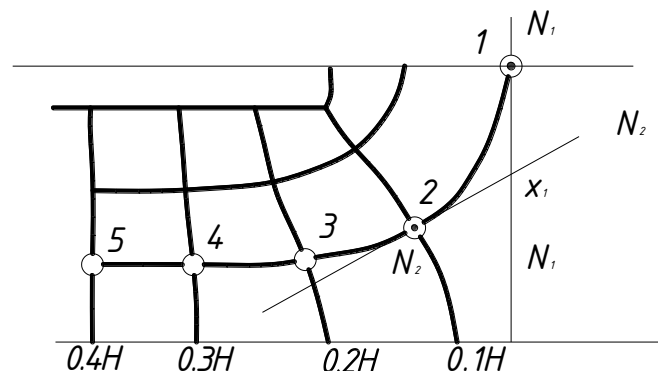


Рисунок 3.3 – Фрагмент гідродинамічної сітки

Для графічної побудови гідродинамічної сітки на лінії дна нижнього б'єфа вибирають точку 1 (рис. 3.3). З цієї точки до лінії дна проводять перпендикуляр N_1 . На сусідній лінії рівного напору $(0,1 H)$ знаходять точку 2 і з умови, що точка x_1 перетину перпендикуляра N_2 , який проведено через точку 2 з перпендикуляром

N_1 , повинна розташовуватись на однаковій відстані від точок 1 і 2, тобто довжини відрізків перпендикулярів N_1 і N_2 до точки їх перетину повинні бути однаковими. Далі з точки 2 перпендикуляр продовжують в сторону еквіпотенціалі 0,2 H . На еквіпотенціалі 0,2 H знаходять точку 3 із тих же умов, що і точку 2. Так послідовно знаходять і інші точки на наступних лініях рівних напорів. З'єднуючи послідовно точки 1, 2, 3, 4, 5, тощо, одержуємо лінією течії.

Мета роботи

- ознайомитись з принципом дії приладу електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА);
- запроектувати 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.

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 натури 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 натури повинні бути подібні.

1. 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. 3.4.

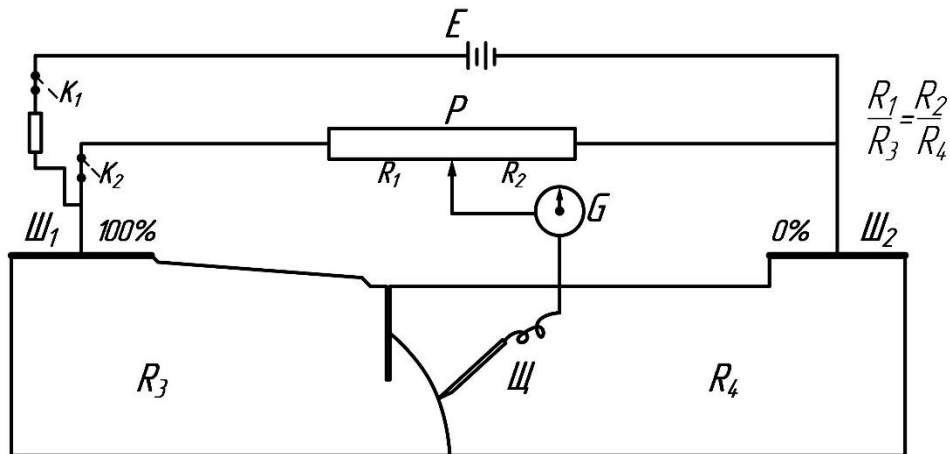


Рисунок 3.4 – Електрична схема приладу ЕГДА: E – джерело струму, P – реостат, G – гальванометр, $\mathcal{U}$ – щуп, $\mathcal{U}_1$, $\mathcal{U}_2$ – шини для підключення моделі до приладу ЕГДА, R_1 – опір електропровідного паперу від шини $\mathcal{U}_1$ до точки прикладення щупа, R_2 – опір електропровідного паперу від точки прикладення щупа до шини $\mathcal{U}_2$

2. Порядок виконання роботи.

1. 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.

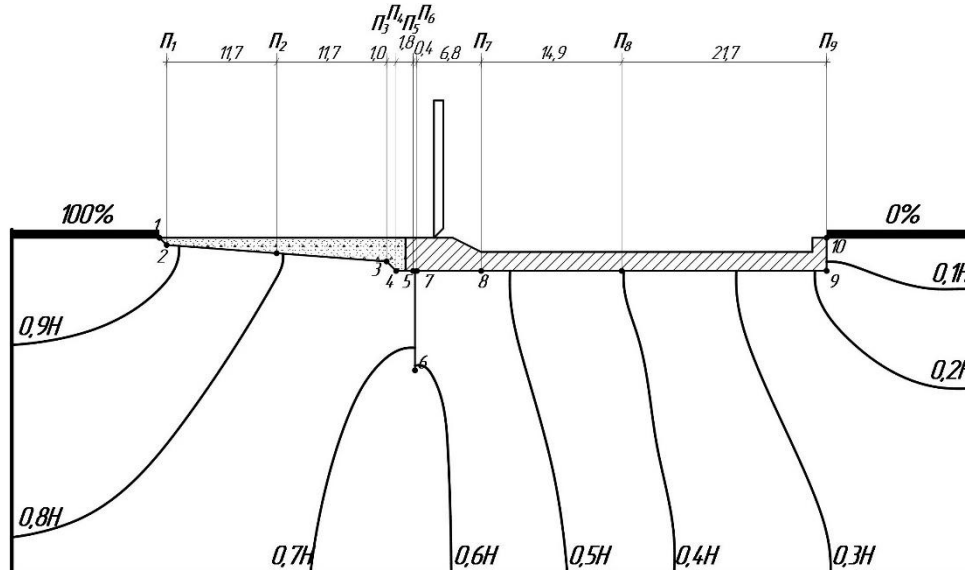


Рисунок 3.5 – Електрична модель активної зони фільтрації №1(лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,1H$, які моделюють лінії рівного напору)

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

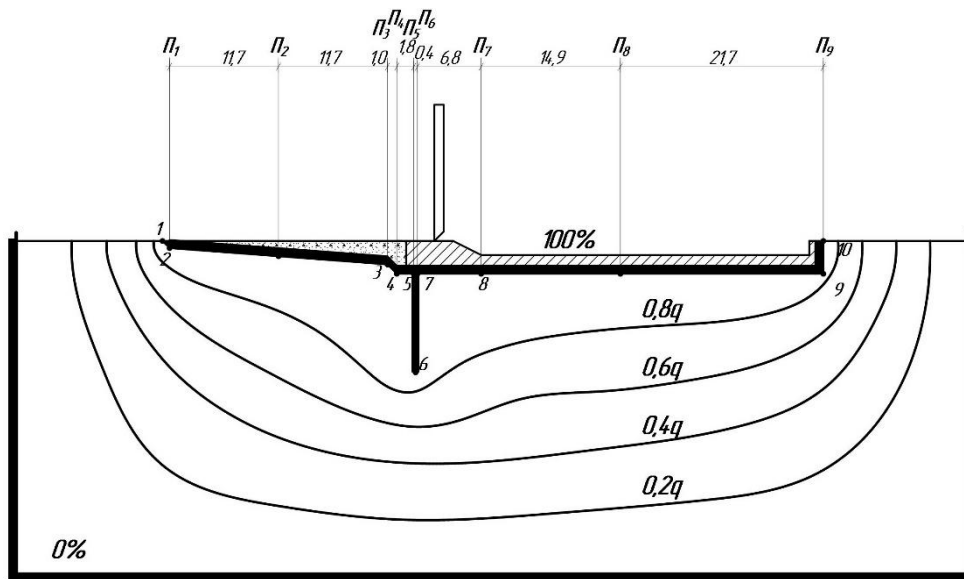


Рисунок 3.6 – Електрична модель активної зони фільтрації №2
(лінії рівного електричного потенціалу з кроком $0,2q$, які моделюють лінії току)

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

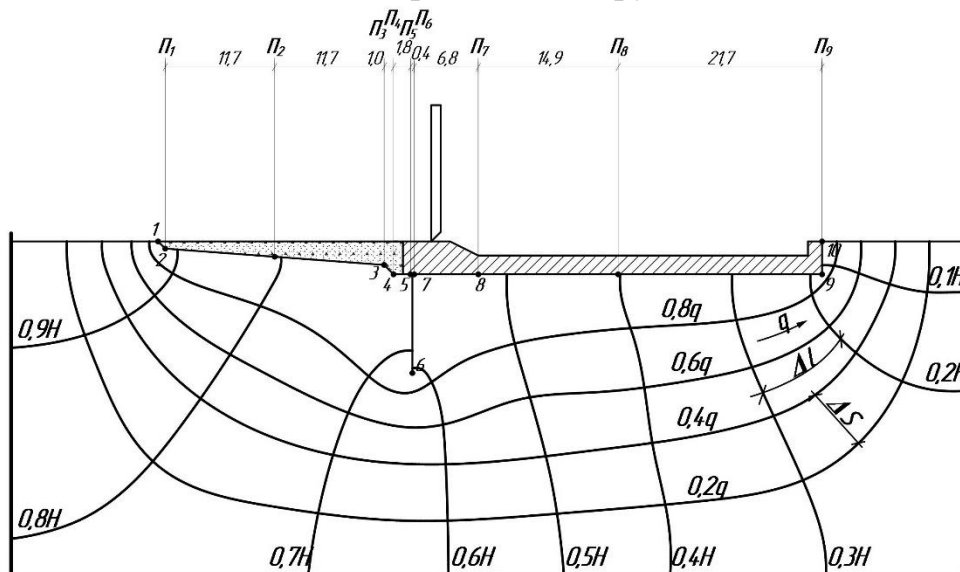


Рисунок 3.7 – Гідродинамічна сітка руху фільтраційного потоку
під флютбетом відкритого регулятора

4. Побудова епюри вихідних градієнтів фільтраційного потоку

- використовуючи гідродинамічну сітку руху фільтраційного потоку будують епюру фільтраційних напорів на підземний контур флютбета. Ординати фільтраційних напорів визначають за значеннями ліній рівного напору в точках їх дотику до лінії підземного контуру флютбету;
- на лінії дна нижнього б'єфу будують епюру вихідних градієнтів, значення

яких знаходять за залежністю $I = \Delta H^H / \Delta S_i^H$, де ΔH^H – втрата напору фільтраційного потоку по довжині лінії течії ΔS_i^H в межах останнього поясу тиску (рис. 3.8);

- епюру вихідних швидкостей будують аналогічно епюрі I ; $V = K_\phi I$, де K_ϕ – коефіцієнт фільтрації ґрунту основи (задають);
- інтегральну криву питомих фільтраційних витрат q будують за значеннями сумарних витрат через кожен стрічку витрати Δq_i^H . Витрату через відповідну стрічку витрати визначають за залежністю $\Delta q_i^H = V_{ci} \cdot \Delta l_i^H$, де V_{ci} – середня швидкість на відповідній стрічці витрати, Δl_i^H – ширина на виході відповідної стрічки витрати.

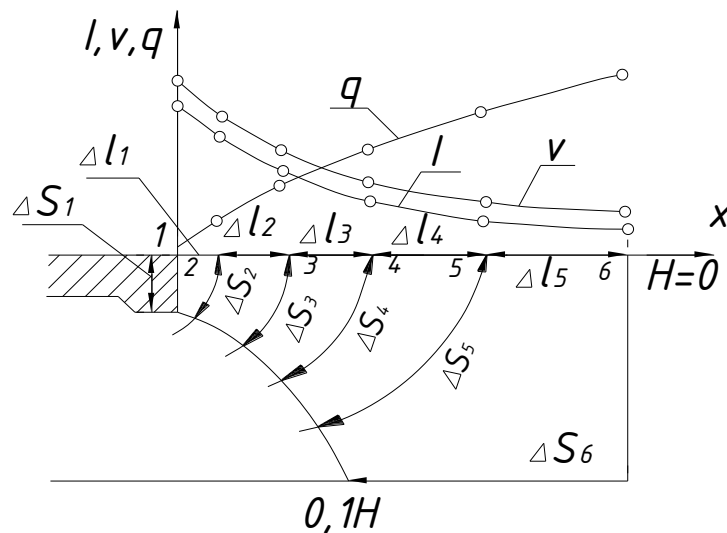


Рисунок 3.8 – Схема для розрахунку і побудови епюр вихідних градієнтів I , швидкостей V та інтегральної кривої питомих фільтраційних витрат q

4. Лабораторна робота №4. Дослідження безнапірної фільтрації в тілі земляної греблі на приладі ЕГДА

Моделювання задач фільтрації з вільними поверхнями значно складніше в порівнянні з процесом моделювання чисто напірних задач фільтрації. Складність полягає в тому, що границя області фільтрації на початку невідома і під час самого процесу необхідно визначити положення кривої депресії.

Для конкретного прикладу розглянемо попередньо моделювання задач фільтрації для однорідної греблі, яку наведено на рисунку 4.1.

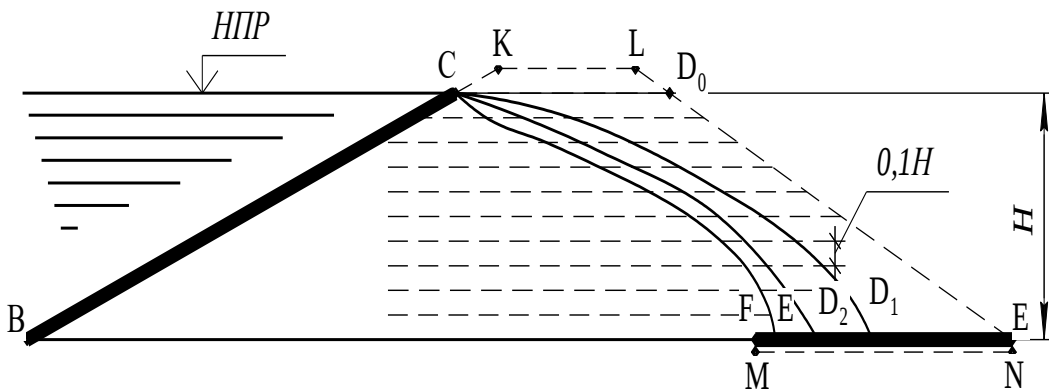


Рисунок 4.1 – Схема до моделювання однорідної греблі на приладі ЕГДА

Дослідження починають з побудови ліній рівного напору, для чого підготовлюють модель ґрунту (ґрунт тіла греблі і основи мають один і той же коефіцієнт фільтрації), використовуючи електропровідний папір.

Потім вздовж лінії ВС встановлюють металеві шини, до яких підключають 100% робочої напруги, а по лінії EF підключають шини з потенціалом 0%. По лінії водоупора та горизонтального дренажа BFMN обрізають модель. Криву депресії CE необхідно відшукати під час експерименту.

Як відомо, крива депресії визначається такими умовами:

- а) крива депресії є граничною лінією течії, вздовж якої $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$;
- б) на кривій депресії тиск дорівнює атмосферному і можна прийняти $p = 0$, оскільки вздовж кривої депресії напір падає за лінійним законом $h = -y$.

В якості першого наближення проводять довільну лінію CD_1 (рис. 4.1), але таким чином, щоб вона розташовувалась вище дійсної кривої депресії.

Якщо обрізати папір по лінії CD_1 , то тим самим буде виконано умову $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$, тому що лінія відрізу електропровідного паперу довільної форми є границею області електропровідності або граничною лінією течії. Але вздовж довільної лінії

CD_1 потенціал буде падати не за лінійним законом, а за якимось іншим.

Щоб вздовж лінії CD_1 витримувалась умова $h = -y$, форму кривої необхідно змінити. Для цього діючий напір H (прийнятий за 100%) розбивають на 5...10 рівних частин і через точки перетину проводять лінії паралельно до горизонту.

Потім на кожній з цих ліній шукають точку, потенціал якої $\phi = y$, або $\phi = 90\%$ для першої допоміжної лінії, $\phi = 80\%$ – для другої допоміжної лінії і т.д. Якщо ці точки розташовуються на кривій CD_1 , то умова $h = -y$ виконується і крива CD_1 є шуканою. Якщо цього немає, то переходять до наступного кроку, обрізавши модель по новій лінії CD_2 і повторюють всі операції знову, доки не отримають такий випадок, що всі точки $\phi = 90\%$, $\phi = 80\%$... $\phi = 10\%$ будуть лежати на перетині кривої депресії з допоміжними пунктирними лініями (точки зазначені кружечками на рис. 4.1).

Нагадуємо, що приведений напір $-\bar{h}$ кількісно дорівнює приведену потенціалу.

Лінію CD_2 , як правило, проводять посередині між лінією CD_1 і знайденими точками, але при цьому необхідно враховувати ту обставину, що точки $\phi = 90\%$, $\phi = 80\%$... не залишаються нерухомими на допоміжних лініях, а змінюють своє положення в залежності від форми кривої CD . Для того, щоб швидше дійти мети, необхідно підбором найти таку послідовність зміни форми кривих CD , при якій точки $\phi = 90\%$, $\phi = 80\%$... відступали б до лінії CB . В іншому випадку криву депресії можна "зарізати" – провести її нижче дійсної кривої депресії і тим самим зіпсувати модель. Після того, коли криву депресії буде знайдено, залишається тільки побудувати лінії рівних напорів і лінії течій і виконати подальшу обробку результатів аналогічно, як і для задачі напірної фільтрації.

Мета роботи

- за допомогою приладу ЕГДА визначити експериментальне положення кривої депресії в тілі моделі земляної греблі;
- за допомогою приладу ЕГДА побудувати гідродинамічну сітку руху фільтраційного потоку в тілі моделі греблі;
- використовуючи побудовану гідродинамічну сітку визначити експериментальне значення питомої фільтраційної витрати;
- визначити положення кривої депресії і порівняти її з відповідними параметрами, одержаними методом ЕГДА.

Основні передумови моделювання напірної фільтрації на приладі ЕГДА

- розглядається плоска задача руху фільтраційного потоку;
- область фільтрації однорідна ($k=\text{const}$);
- рух фільтраційного потоку ustalений.

2. 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 водоупором, лінією верхового укосу греблі, лінією дренажу і кривою депресії. Електричну схему підключення моделі до приладу ЕГДА наведено на рис. 4.2.

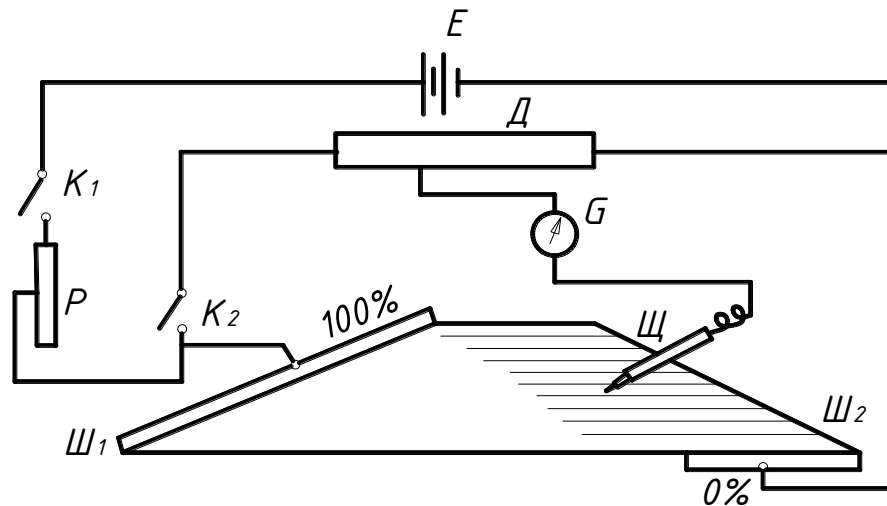


Рисунок 4.2 – Схема підключення моделі греблі до приладу ЕГДА

2. Порядок виконання роботи.

1. За заданою схемою (рис. 4.3) з електропровідного паперу вирізаємо модель земляної греблі з запасом паперу 2...3 мм в місцях для підключення шин Ш₁ і Ш₂.

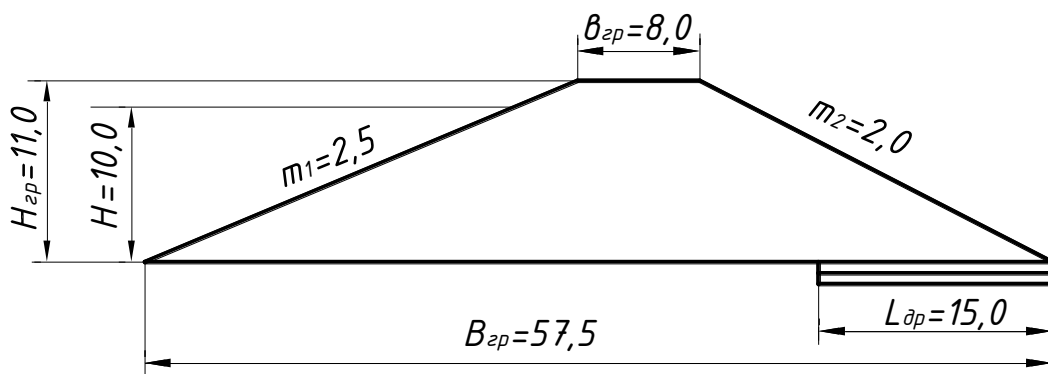


Рисунок 4.3 – Схема підключення моделі греблі до приладу ЕГДА

2. Напір H ділять на 10 частин і на моделі кольоровим олівцем проводять горизонтальні лінії через $0,1H$.

3. На моделі греблі з електропровідного паперу попередньо підрізають криву депресії, положення якої є явно завищеним в порівнянні з точним її положенням;

4. Попередньо підрізану модель підключають до приладу ЕГДА;

5. 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.

6. Виконують наступне підрізання моделі вже ближче до одержаних точок, 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 ($\frac{dh}{dn} = 0$);

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 підрізання моделі.

7. Після визначення точного положення кривої депресії за допомогою приладу ЕГДА будують лінії рівних напорів.

8. Використовуючи властивості гідродинамічної сітки (ортогональність ліній і постійність модуля сітки), лінії течії рекомендується будувати графічним способом.

9. Визначаємо теоретичне положення кривої депресії в тілі греблі за наступними залежностями та схемою на рис. 4.4

$$\frac{q_T}{K_\phi} = \frac{H^2}{2L_P^H} \quad (4.1)$$

$$L_P^H = L^H + \Delta L_e^H \quad (4.2)$$

$$L = m_1(H_{гр} - H) + e_{гр} + m_2 H_{гр} - L_{др}; \quad \Delta l_e = 0,4H \quad (4.3)$$

$$h_T = \sqrt{2 \frac{q_T}{K_\phi} (L + \Delta L_{др} - X)} \quad (4.4)$$

$$\Delta L_{др} = 0,5 \frac{q_T}{K_\phi} \quad (4.5)$$

Викреслюємо в стандартному масштабі на міліметровому папері греблю, на яку наносять гідродинамічну сітку з експериментальною і теоретичною кривими депресії (рис. 4.4).

За результатами лабораторної роботи роблять висновки про точність теоретичного методу.

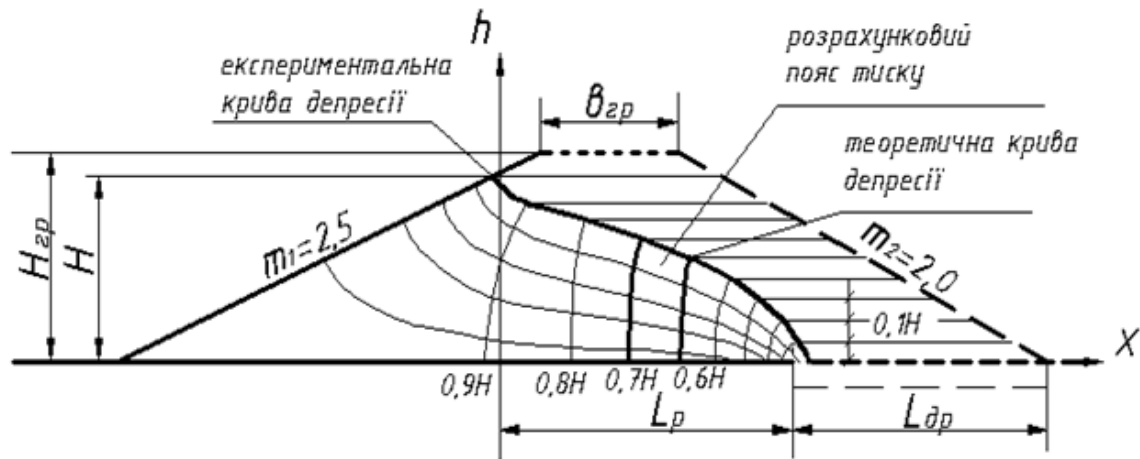


Рисунок 4.4 – Гідродинамічна сітка руху фільтраційного потоку в земляній греблі

Рекомендована література

1. 02/03-03S Корнійчук, В.І. (2025) Силабус навчальної дисципліни «Гідротехнічні споруди енергетичних об'єктів і систем» для здобувачів вищої освіти ступеня «бакалавр», які навчаються за освітньою програмою «Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика».
2. Лабораторний практикум з гідротехнічних споруд : навч. посіб. / М. М. Хлапук, О. Є. Щодро, О. М. Ніколайчук та ін. Рівне : НУВГП, 2016. 105 с.
URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/8228/>
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.