

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

**О.Є. КОШЛЯКОВ
В.І. МОКІЄНКО**

**ПРАКТИКУМ
З ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД**

Київ-2006

***Рекомендовано
вченою радою геологічного факультету
(протокол № 1 від 13 вересня 2004 року)***

ВСТУП

Згадуються основні положення загальноосвітніх і геологічних дисциплін, що надалі будуть використовуватись у курсі "Динаміка підземних вод" для полегшення адаптації до нового матеріалу та кращого його засвоєння.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що вивчає динаміка підземних вод (ДПВ)?

Декілька варіантів визначень:

ДПВ – вчення про закономірності руху води у пористих і тріщинуватих гірських породах, що розглядає систему "вода-порода" (І.Є.Жернов).

ДПВ вивчає кількісні закономірності руху підземних вод, розробляє теоретичні основи та методи геогідродинамічних розрахунків, що відповідають умовам формування режиму та балансу підземних вод під впливом природних і штучних факторів (В.М.Шестаков).

ДПВ (гідрогеодинаміка) – галузь гідрогеології, що досліджує закони руху води в земній корі (І.С.Зекцер).

2. Які природні сили викликають рух підземних вод?

Слід розрізнати негравітаційний і гравітаційний рух підземних вод.

Негравітаційний рух характерний для фізично зв'язаної вологи в зоні аерації та дрібнодисперсних глинистих порід. Цей рух виникає за рахунок різниці пружності водяної пари та залежить від розмірів частинок породи, розмірів пор, концентрації порового розчину. Цей вид руху має назву міграції вологи.

Гравітаційний рух обумовлюється дією сили земного тяжіння в зонах аерації та насичення за наявності різниці гідродинамічних напорів.

3. Які властивості гірських порід дають можливість воді рухатись крізь породу?

Такими властивостями є пористість і тріщинуватість гірських порід.

4. Що таке пористість?

Пористість – загальний об'єм всіх пустот у породі. Кількісно пористість характеризується коефіцієнтом пористості, що дорівнює відношенню об'єму пор породи до зразку до всього об'єму зразка породи.

5. Що таке тріщинуватість?

Тріщинуватість – сукупність у гірських породах тріщин різного походження, як правило з'єднаних між собою. Кількісно тріщинуватість характеризується коефіцієнтом тріщинуватості, що дорівнює відношенню об'єму тріщин у зразку породи до загального об'єму зразка породи.

6. Які гірські породи є пористими?

Піски, піщаники, алевроїти, суглинки, супіски, глини.

7. Яку розмірність має величина коефіцієнта пористості (тріщинуватості)?

Виходячи з розуміння того, що коефіцієнт пористості (тріщинуватості) являє собою співвідношення об'ємів, пористість є величиною безрозмірною.

8. Що таке розмірність?

Це вираз зв'язку даної фізичної величини з величинами, покладеними в основі системи одиниць. Відповідно, розмірність будь-якої фізичної величини

визначається співвідношенням між нею та тими фізичними величинами, що прийняті за основу. Наприклад, для позначення розмірності фізичних величин застосовуються такі символи: L – розмірність довжини, M – розмірність маси, T – розмірність часу.

9. Що таке витрата водного потоку взагалі?

Це кількість води, що протікає через поперечний переріз потоку за одиницю часу.

10. Що таке витрата потоку підземних вод?

Це кількість води, що протікає через живий переріз потоку за одиницю часу.

11. Яку розмірність має витрата потоку?

В гідрогеології та ДПВ розмірність витрати потоку підземних вод – куб. м/діб або л/с (у загальному випадку L^3/T).

12. Що є основними характеристиками потоків підземних вод?

Основними характеристиками потоків підземних вод є величини їх рівнів (напорів) і витрат.

13. Що таке рівень підземних вод?

Рівень підземних вод – це положення вільної або напірної поверхні підземних вод по відношенню до деякої площини порівняння.

14. Що таке водоносний горизонт і водоносний комплекс?

Це частина геологічного пласта чи весь пласт, заповнений гравітаційною водою, що має єдину водну поверхню (напірну чи безнапірну). У водоносному горизонті виділяють зону живлення, зону розповсюдження (транзиту) та зону розвантаження. Якщо в товщі водоносних і водотривких порід із різних причин важко виділити самостійні в гідравлічному відношенні водоносні горизонти, йдеться про водоносні комплекси.

15. Яким чином відображується рівень (напір) підземних вод на гідрогеологічній карті?

Рівень (напір) підземних вод відображується на гідрогеологічній карті у вигляді ізоліній, що з'єднують точки з однаковими значеннями рівня або напору. Такі ізолінії мають назву гідроізогіпс (ізолінії рівня) або гідроізоп'єз (ізолінії напору).

16. Що таке фільтрація підземних вод?

Фільтрація – процес руху підземних вод, що виникає у насичених гірських породах під дією природних і штучних факторів.

17. Що таке потоки та басейни підземних вод в ДПВ?

Область розповсюдження підземних вод, що перебувають у стані спокою, називається басейном підземних вод. Як правило, басейни приурочені до крупних синклінальних структур, крайових прогинів. За наявності руху підземних вод йдеться про потоки. Поняття басейну є умовним (коли рух підземних вод непомітний). ДПВ вивчає потоки підземних вод.

ТЕМА 1. ОСНОВИ ДИНАМІКИ ВОДНИХ ПОТОКІВ. СТРУМЕНИСТА МОДЕЛЬ РУХУ РІДИНИ

Ключові поняття ДПВ – гідростатичний і гідродинамічний напір. Відображення фундаментальних законів руху рідини в ДПВ.

Основні положення:

Поле (фізичне) – особлива форма матерії з нескінченним числом ступенів свободи. Джерелом фізичного поля є частка (наприклад, для електромагнітного поля – заряджена частка).

Тиск – нормальна поперехнева сила, що діє на одиницю площі.

Швидкість – величина, що характеризує рух матеріальної точки і рівна відношенню величини пройденого точкою шляху до часу, за який цей шлях був пройдений.

Гідродинаміка – частина гідромеханіки, наука про рух рідин під дією зовнішніх сил та про взаємодію між рідиною та іншими об'єктами при їх відносному русі.

Головні питання та відповіді теми:

1. Які поняття гідромеханіки використовуються при розгляді струменистої моделі рідини?

Використовуються такі поняття: суцільне середовище, гідростатичний тиск, поле швидкостей, поле тисків, лінія течії, поверхня течії, траєкторія, струминка, трубка течії.

2. Що лежить в основі понять "суцільне середовище" та "гідростатичний тиск"?

Суцільне середовище – приймається, коли рідина рухається суцільним потоком. *Гідростатичний тиск* – властивість рідини, що залежить від положення часток рідини у просторі та дії зовнішніх сил.

3. Що таке "поле швидкостей" та "поле тисків"?

Поле швидкостей – розподіл швидкостей у просторі, зайнятому рідиною. *Поле тисків* – розподіл тисків у просторі, зайнятому рідиною. Якщо поля тисків і швидкостей не змінюються у часі, то їх називають усталеними (стаціонарними), у протилежному випадку – неусталеними (нестационарними).

4. Що означають поняття "лінія течії", "поверхня течії", "траєкторія"?

Лінія течії (лінія току) – векторна лінія поля швидкостей. *Поверхня течії* – сукупність ліній течії, проведена через деякий замкнутий контур. *Траєкторія* характеризує переміщення конкретної точки у просторі. Лінії течії та траєкторії збігаються при усталеному русі рідини (при стаціонарному полі швидкостей).

5. Що таке "струминка" та "трубка течії"?

Струминка – частина рідини, що обмежена траєкторією точок замкнутого контуру. *Трубка течії* – частина рідини, що виділена із загального об'єму рідини поверхнею течії. Якщо замкнутий контур є нескінченно малим, трубка течії називається елементарною.

6. Як визначається витрата та швидкість елементарної трубки течії (струминки)?

Витрата елементарної трубки течії (струминки) q_e визначається за допомогою формули:

$$q_e = \frac{\Delta \bar{\omega}_{cep} \cdot \Delta l}{\Delta t}, \quad (1.1)$$

де $\Delta \bar{\omega}_{cep}$ – середня площа перерізу трубки течії (струминки); Δl – довжина трубки течії (струминки); Δt – час, за який вимірюється витрата.

Швидкість елементарної трубки течії (струминки) v_e визначається за допомогою формули:

$$v_e = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (1.2)$$

7. Що таке "середня швидкість" потоку підземних вод?

Середня швидкість v_{cep} – це уявна, однакова для всіх точок перерізу швидкість, за якої загальна витрата потоку така, як і при дійсній швидкості, не однакою для різних точок перерізу. Визначається за такою залежністю:

$$v_{cep} = \frac{q}{\bar{\omega}_{cep}}, \quad (1.3)$$

де q – витрата потоку; $\bar{\omega}_{cep}$ – середня площа перерізу потоку.

8. Як визначається загальна витрата потоку?

Загальна витрата потоку визначається за залежністю:

$$Q = \sum q_e = \sum (v_e \cdot \Delta \bar{\omega}_{cep}). \quad (1.4)$$

9. Які види руху рідини розглядаються в ДПВ?

Розглядаються рівномірний, нерівномірний та плавно змінний види руху.

10. Що таке "рівномірний рух" рідини?

Це такий рух, за якого система ліній току виражається сукупністю взаємно паралельних і рівно направлених прямих. Площі живих перерізів у будь-якому місці струминки будуть при цьому однакові. Відповідно постійною буде і швидкість у межах струминки.

11. Що таке "нерівномірний рух" рідини?

Це такий рух, за якого лінії току мають довільне розташування, а площі живих перерізів і швидкості змінюються за довжиною потоку.

12. Що таке "плавно змінний" рух рідини?

В такому випадку лінії току характеризуються дуже малою кривизною, а кут розходження між окремими лініями току настільки малий, що живі перерізи струминки можна вважати площинами нормальними до ліній токів, а площі живих перерізів змінюються вздовж потоку дуже плавно, як і середня швидкість руху рідини.

13. Наведіть схему сил, що діють на струминку рідини під час руху.

Схема представлена на рис. 1.1.

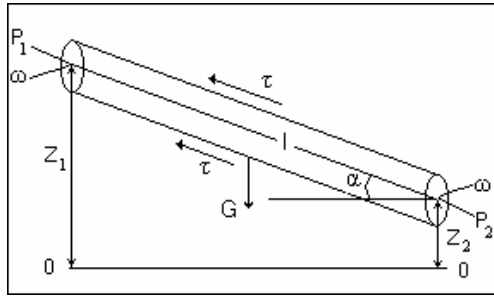


Рис. 1.1. Сили, що діють на струминку рідини під час руху

Позначення: P_1 , P_2 – тиск; Z_1 , Z_2 – висота над площиною порівняння 0-0; $G = \gamma \cdot \omega \cdot l$ – сила тяжіння; γ – питома вага рідини; ω – площа поперечного перерізу струминки; τ – сила опору; α – кут нахилу до площини порівняння.

14. Яке рівняння відображує рівновагу сил, що діють у напрямі руху струминки рідини?

Рівняння рівноваги має вигляд:

$$P_1 - P_2 + G \cdot \sin \alpha = \tau, \quad (1.5)$$

де p_1 , p_2 – сили тиску ($p = P \cdot \omega$).

15. Як визначається потенціал фільтрації?

Потенціал фільтрації ϕ визначається за залежністю:

$$\phi = P + \gamma \cdot Z. \quad (1.6)$$

16. Як визначається градієнт потенціалу фільтрації?

Градієнт потенціалу фільтрації I_ϕ визначається за залежністю:

$$I_\phi = \frac{\phi_1 - \phi_2}{l}. \quad (1.7)$$

де l – довжина шляху фільтрації.

17. Як визначається "висота тиску" (п'єзометрична висота)?

Висота тиску h_p визначається за залежністю:

$$h_p = \frac{P}{\gamma}. \quad (1.8)$$

18. Що таке "гідростатичний напір"?

Гідростатичний напір H характеризує рівень потенційної енергії в точці потоку. Він визначається за залежністю:

$$H = \frac{\phi}{\gamma} = \frac{P + \gamma \cdot Z}{\gamma} = \frac{P}{\gamma} + Z. \quad (1.9)$$

19. Що таке "швидкісний напір"?

У процесі руху рідини з'являється кінетична енергія, що залежить від швидкості. Швидкісний напір h_v характеризує рівень кінетичної енергії в будь-якій точці потоку рідини, він визначається за залежністю:

$$h_v = \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (1.10)$$

де v - швидкість руху рідини; g - прискорення сили тяжіння

20. Що таке "гідродинамічний напір"?

Гідродинамічний напір H_d являє собою суму гідростатичного та швидкісного напорів:

$$H_d = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2 \cdot g}. \quad (1.11)$$

21. Що таке "ідеальна рідина"?

Ідеальною, або невязкою рідиною в гідравліці називається нестискувана рідина, в'язкість якої дорівнює нулю. В процесі руху такої рідини не виникає ніякого тертя. Поняття ідеальної рідини умовне. У природних умовах така рідина не існує, а існує реальна стискувана в'язка рідина.

22. Який вигляд має рівняння Бернуллі для ідеальної рідини?

Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини має такий вигляд:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}. \quad (1.12)$$

Цю залежність також можна записати у такому вигляді:

$$H_d = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = const, \quad (1.13)$$

або:

$$H_d = Z + h_\partial + h_v = const, \quad (1.14)$$

або так:

$$H_d = H + h_v = const. \quad (1.15)$$

23. Який вигляд має рівняння Бернуллі для реальної рідини?

Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини має такий вигляд:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H_{TP}, \quad (1.16)$$

де ΔH_{TP} – втрати напору на подолання сил тертя при русі реальної рідини.

24. Які режими руху рідини розглядаються в ДПВ?

У ДПВ розглядаються головним чином ламінарний і турбулентний режими руху рідини.

25. Що таке "ламінарний режим" руху рідини?

Для ламінарного (струменистого) режиму руху рідини характерний рух окремими струминками, між якими відсутнє гідравлічне перемішування. Він спостерігається при малих швидкостях течії.

26. Що таке "турбулентний режим" руху рідини?

Турбулентний (неупорядкований) рух рідини спостерігається при достатньо великих значеннях швидкості течії. Для нього характерний активний прояв внутрішньої пульсації часток потоку, що обумовлює гідравлічне перемішування між окремими струминками.

27. Для чого використовується число Рейнольдса?

Число Рейнольдса використовується для визначення режиму руху рідини.

28. Яку розмірність має числа Рейнольдса?

Число Рейнольдса – величина безрозмірна.

Додаткові запитання до теми:

1. У чому полягає енергетичний зміст рівняння Бернуллі для ідеальної рідини?
2. Що в енергетичному плані відображають такі складові рівняння Бернуллі для ідеальної рідини, як висота тиску та швидкісний напір?
3. У чому полягає енергетичний зміст рівняння Бернуллі для реальної рідини?
4. Яка частина рівняння Бернуллі характеризує величину потенційної енергії в певній точці потоку?
5. Які величини застосовуються для визначення числа Рейнольдса?

Задача №1.1

Визначити величину градієнта потенціалу фільтрації між точками А та В потоку рідини (див. рис. 1.2), густина якої відповідно становить (0,8, 1,0, 1,1 г/куб. см).

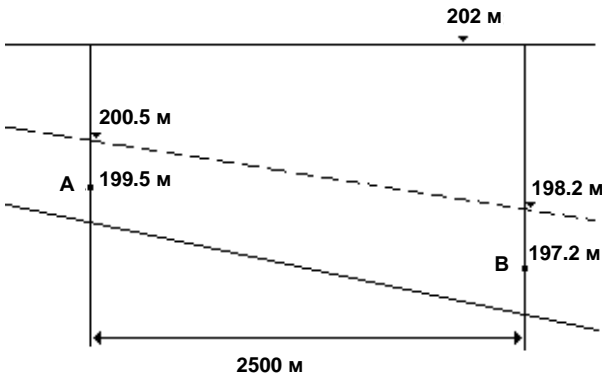


Рис. 1.2. Схема до задачі № 1.1

ТЕМА 2. ЗАКОНИ ФІЛЬТРАЦІЇ

Основний закон фільтрації, що базується на струменистій моделі руху рідини в поровому просторі. Межі його застосування та взаємозв'язок з іншими законами фільтрації. Зміст одного з найважливіших понять ДПВ – коефіцієнта фільтрації, його місце в фундаментальних законах фільтрації. Зв'язок коефіцієнта фільтрації з коефіцієнтом проникності.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що таке "процес фільтрації"?

Процес фільтрації – це процес руху рідини в рихлих і тріщинуватих гірських породах при повному насиченні цих порід водою.

2. Що являє собою процес фільтрації з позиції гідродинаміки?

Процес фільтрації підпорядковується законам і закономірностям гідродинаміки (гідравліки), тобто відбувається під дією потенціалу фільтрації, або гідродинамічного напору, та описується рівнянням Бернуллі для реальної рідини.

3. Що таке "швидкість фільтрації" за Дююї?

За пропозицією французького гідравліка Дююї швидкість фільтрації v визначається за залежністю:

$$v = \frac{Q}{\omega}, \quad (2.1)$$

де Q – витрата потоку підземних вод; ω – площа поперечного перерізу потоку (включаючи в перерізі площу всіх пор і частинок породи).

4. Що таке "дійсна швидкість фільтрації"?

Дійсна швидкість фільтрації визначається за залежністю:

$$v_o = \frac{Q}{\omega \cdot n_a}, \quad (2.2)$$

де n_a – активна пористість.

5. Що таке "активна пористість"?

На відміну від пористості, що являє собою відношення об'єму пустот (пор) до загального об'єму зразка породи, активна (ефективна) пористість n_a – це відношення об'єму пор, по яких може відбуватись рух гравітаційної води, до загального об'єму зразка породи.

6. Як співвідносяться "швидкість фільтрації" та "дійсна швидкість фільтрації"?

Таке співвідношення можна представити залежністю:

$$v = v_o \cdot n_a. \quad (2.3)$$

7. Яка залежність встановлена законом Дарсі?

Закон Дарсі показує, як витрата Q (швидкість v) потоку підземних вод залежить від п'єзометричного ухилу водного потоку I (градієнту напору) та властивостей гірських порід і рідини, що фільтрується, при ламінарному русі рідини:

$$Q = K \cdot \omega \cdot I, \quad (2.4)$$

де K – коефіцієнт пропорційності (фільтрації).

Залежність (2.4) являє собою закон Дарсі у так званій витратній формі.

8. Який вигляд має закон Дарсі у швидкісній формі?

Закон Дарсі у швидкісній формі має такий вигляд:

$$v = K \cdot I. \quad (2.5)$$

9. Що характеризує коефіцієнт фільтрації (коефіцієнт пропорційності в законі Дарсі)?

Коефіцієнт фільтрації характеризує водопровідні властивості гірської породи та властивості рідини, що фільтрується.

10. Що таке "градієнт напору" та яка його розмірність?

Градiєнт напору визначається за допомогою залежності:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{\Delta l} = \frac{\Delta H}{\Delta l}, \quad (2.6)$$

де H_1, H_2 – величини гідродинамічного напору в різних перерізах потоку, м;
 Δl – відстань між перерізами, м.

Гradient напору – величина безрозмірна.

11. Яку розмірність має коефіцієнт фільтрації?

Виходячи з того, що gradient напору – величина безрозмірна, коефіцієнт фільтрації має розмірність швидкості LT^{-1} і в кількісному відношенні являє собою фіктивну швидкість при одиничному напірному gradientі. В ДПВ за одиницю коефіцієнту фільтрації звичайно приймається 1 м/доб.

12. У яких випадках у ДПВ використовується поняття "коефіцієнт проникності"?

Якщо рідина, що фільтрується через породу, за своїми властивостями (густинною та в'язкістю) відрізняється від прісної (слабо мінералізованої) води, то в розрахункових залежностях використовується коефіцієнт проникності.

13. Яке співвідношення між коефіцієнтом фільтрації та коефіцієнтом проникності?

$$K = K_{II} \frac{\gamma}{\eta} = K_{II} \frac{\rho \cdot g}{\eta} = K_{II} \frac{g}{\nu}, \quad (2.7)$$

де K_{II} - коефіцієнт проникності; γ – питома вага рідини, що фільтрується; η – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, що фільтрується; ρ – густина рідини, що фільтрується; g – прискорення сили тяжіння; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, що фільтрується.

14. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт проникності?

Коефіцієнт проникності має розмірність площі (L^2) і вимірюється в дарсі (D). 1D дорівнює $1,02 \cdot 10^{-12}$ кв. м.

15. Для яких гірських порід отриманий закон турбулентної фільтрації (закон Краснопольського)?

Для порід, де спостерігаються крупні пустоти та тріщини, де рух рідини відповідає руху водних потоків у відкритих руслах і каналах.

16. Який вигляд має закон Краснопольського у витратній і швидкісній формі?

У витратній формі закон Краснопольського має такий вигляд:

$$v = K_K \cdot \sqrt{I}. \quad (2.8)$$

де K_K – коефіцієнт фільтрації за Краснопольським.

У швидкісній формі закон Краснопольського має такий вигляд:

$$Q = K_K \cdot \omega \cdot \sqrt{I}. \quad (2.9)$$

17. Як визначається швидкість турбулентного режиму руху водних потоків відповідно до закону Шезі?

Така швидкість визначається за такою залежністю:

$$v = C \cdot \sqrt{R} \cdot \sqrt{I}, \quad (2.10)$$

де C – коефіцієнт Шезі; R – гідравлічний радіус потоку.

18. За якої умови вирази законів Краснопольського та Шезі збігаються?

Вирази збігаються за умови, що

$$K_K = C \cdot \sqrt{R} . \quad (2.11)$$

19. Що таке змішана фільтрація?

Це одночасне існування в потоках підземних вод ламінарного та турбулентного режиму фільтрації (в окремих його частинах).

20. Для яких ділянок потоку може бути характерною змішана фільтрація?

Змішана фільтрація може бути характерною для ділянок поблизу діючих свердловин, у зонах перетину дрібних і крупних тріщин, а також у районах розвиту крупних тріщин і пустот.

21. Для яких гірських порід може бути характерною змішана фільтрація?

Змішана фільтрація може бути характерною для вапняків, піщаників, відкладів крейди.

22. Якими залежностями описується змішана фільтрація?

Змішана фільтрація описується формулами Смрекера або Проні. Формулою Смрекера має вигляд:

$$v = K \cdot \sqrt[m]{I} , \quad (2.12)$$

де $1 \leq m \leq 2$.

Формула Проні має вигляд:

$$I = a \cdot v + b \cdot v^2 , \quad (2.13)$$

де a , b – відповідні коефіцієнти.

23. Чому для опису змішаної фільтрації краще підходить формула Проні?

В формулі Смрекера величина m , що змінюється від 1 до 2 (для ламінарного режиму фільтрації $m = 1$, для турбулентного режиму фільтрації $m = 2$) , є функцією швидкості, внаслідок чого така задача не може бути коректно розв'язана. В формулі Проні перша складова ($a \cdot v$) відповідає лінійному закону фільтрації, друга ($b \cdot v^2$) – квадратичному. Залежно від величини швидкості одна зі складових набуває значення, яке є значно меншим, ніж значення другої складової.

24. Що являють собою коефіцієнти в формулі Проні?

Виходячи з того, що в формулі Проні перша складова ($a \cdot v$) відповідає лінійному закону фільтрації, друга ($b \cdot v^2$) – квадратичному,

$$a = \frac{1}{K} , \quad (2.14)$$

$$b = \frac{1}{K_K^2} . \quad (2.15)$$

25. Чи існують обмеження застосуванню закону Дарсі?

Закон Дарсі справедливий для більшості пористих порід у межах певного діапазону швидкості фільтрації. Існують верхня та нижня межі застосування закону Дарсі.

26. Чим обумовлена верхня межа застосування закону Дарсі?

Верхня межа застосування закону Дарсі обумовлена проявом інерційних і пульсаційних сил при фільтрації води через породи значної проникності з великою швидкістю (порушенням ламінарного режиму течії).

27. Що таке число Рейнольдса?

Це число, за допомогою якого можна визначити порушення ламінарного режиму течії (перехід до турбулентного режиму течії). Експериментально встановлені критичні значення числа Рейнольдса, при перевищенні яких спостерігається турбулентний режим.

28. Як розраховується число Рейнольдса для процесів фільтрації підземних вод?

Для процесів фільтрації число Рейнольдса розраховується за допомогою емпіричних формул (для сипучих однорідних порід – формула Павловського, для неоднорідних порід – формула Котяхова, для цементованих порід – формула Щелкачова).

29. Яку розмірність має число Рейнольдса?

Число Рейнольдса – величина безрозмірна.

30. Чим обумовлена нижня межа застосування закону Дарсі?

Нижня межа застосування закону Дарсі пов'язана з уявленнями про ньютонівські та в'язкопластичні рідини. Крім того, експериментально встановлено, що в ультратонких капілярах (105–110 мкм) рух води практично припиняється.

Додаткові запитання до теми:

1. Чому закон Дарсі називають "лінійним законом фільтрації"?
2. Чому закон Дарсі називають "основним законом фільтрації"?
3. Що характеризує коефіцієнт проникності?
4. Чому чисельно дорівнює 1Д?
5. Який режим руху рідини відповідає закону Дарсі?
6. Яка частина формули Проні відповідає закону Дарсі?
7. Що відображує коефіцієнт Шезі?
8. Що таке гідравлічний радіус?
9. Чому закон Краснопольського вважається нелінійним (квадратичним) законом фільтрації?

Задача № 2.1

Умова та варіанти завдань:

Визначити величину швидкісного напору для різних типів гірських порід за такими даними:

Порода	Варіант	К мін	Варіант	К сер.	Варіант	К макс.
Горф	1	0,1	5	1	9	5
Піски дрібно та середньозернисті	2	1	6	5	10	10
Піски крупнозернисті	3	10	7	50	11	75
Галечники	4	50	8	250	12	500
Напірний градієнт	0,01		0,025		0,05	

Величина коефіцієнту фільтрації (К) виражена в м / діб.

Задача № 2.2

Показати, що коефіцієнт проникності має розмірність площі. Для розв'язання скористатись таблицею одиниць геометричних і механічних величин, розмірність динамічного та кінематичного коефіцієнтів в'язкості прийняти в системі одиниць СІ.

Задача № 2.3

Визначити:

1. Швидкість фільтрації, за якої виникає помітне порушення закону Дарсі, за даними досліду в фільтраційному приладі.
 2. Розрахувати критичну швидкість за формулою Павловського.
 3. Визначити коефіцієнт фільтрації ґрунту за допомогою графіку.
- Дані досліду наведені в наступній таблиці:

Q, куб. см/с	ΔH , м
0	0.01
0	0.02
0,07	0.036
0,45	0.1
0,9	0.5
1,35	0.75
1,58	1.0
1,75	1.25

Додаткові дані, необхідні для розв'язку задачі:

Внутрішній радіус циліндра фільтраційного приладу $r = 1,5$ см;

Довжина фільтраційної трубки $L = 1$ м;

Активна пористість $n_a = 0.2$;

Діючий діаметр зерен $d_e = 0.15$ см;

Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 0.0108$ кв. см/с;

Критичне значення числа Рейнольдса $R_{кр} = 7 \div 9$.

Задача № 2.4

Умова та варіанти завдань:

Визначити:

1. Величину витрати потоку ґрунтових вод до меліоративного каналу.
2. Час, за який частка води дійде від вододілу до каналу.

За такими даними:

H1 – абсолютна відмітка ґрунтових вод на вододілі, м

H2 – абсолютна відмітка ґрунтових вод у каналі, м

H3 – абс. Відмітка водотривкого шару, м

L1 – відстань від вододілу до каналу, м

L2 – довжина каналу, м

K – коефіцієнт фільтрації, м/доб

n_a – активна пористість

Варіанти завдань

Варіант	H1	H2	H3	L1	L2	K	n_a
1	112	110	108	500	100	1	0,25
2	112	110	108	600	100	0,5	0,25
3	112	110	108	750	100	1	0,25
4	112	110	108	350	100	1	0,25

Варіант	H1	H2	H3	L1	L2	K	n _a
5	112	110	108	550	150	1	0,25
6	112	110	108	650	150	4	0,25
7	112	108	106	800	150	2	0,25
8	112	108	106	700	150	5	0,25
9	112	108	106	400	200	2,5	0,25
10	112	108	106	1000	200	3	0,25
11	112	108	106	900	200	1	0,25
12	112	108	106	850	200	1,5	0,25
13	115	112	106	500	200	5	0,25
14	112	108	106	700	180	1,5	0,25
15	112	108	106	600	200	5	0,25
16	114	108	106	400	250	1,5	0,25
17	114	108	106	500	200	3,5	0,25
18	115	110	106	700	250	1	0,25
19	112	108	104	800	200	5	0,25
20	114	109	106	700	230	2	0,25
21	112	108	104	500	150	3,5	0,25
22	112	108	106	550	225	5	0,25
23	110	104	102	650	300	1,5	0,25
24	110	106	103	700	180	2	0,25
25	112	108	104	500	250	1,5	0,25

ТЕМА 3. ЄМНІСНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Причини та характер прояву ємнісних властивостей насичених рідиною гірських порід, способи чисельного відображення цих важливих характеристик.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що означає поняття "ємнісні властивості" гірських порід?

Це здатність гірських порід поглинати, утримувати та віддавати певну кількість рідини.

2. Які види ємності (водовіддачі) гірських порід розглядаються в ДПВ?

Розглядають гравітаційну ємність (водовіддачу), коли рідина може бути отримана з породи шляхом вільного стікання, та пружну ємність (водовіддачу), коли рідина може бути отримана з породи під дією додаткового навантаження.

3. Як визначається коефіцієнт гравітаційної водовіддачі гірських порід?

Коефіцієнт гравітаційної водовіддачі μ визначається за залежністю:

$$\mu = \frac{\Delta V}{F \cdot \Delta H}, \quad (3.1)$$

де ΔV – об'єм рідини, яка може бути отримана зі зразка породи шляхом вільного стікання; F – площа поперечного перерізу зразка породи; ΔH – висота зразка породи.

Тут $F \cdot \Delta H$ – так званий "осушений об'єм" породи. Осушений об'єм – поняття умовне, оскільки частина вологи завжди залишається в породі.

4. Як інакше можна визначити гравітаційну водовіддачу гірських порід?

Гравітаційна водовіддача може бути визначена також за допомогою залежності:

$$\mu = n - \frac{\Delta_{ск} \cdot W_M}{\Delta \epsilon}, \quad (3.2)$$

де n – загальна пористість породи; $\Delta_{ск}$ – об'ємна маса скелету породи; W_M – максимальна молекулярна вологоємність породи; $\Delta \epsilon$ – об'ємна маса рідини.

Також допускається, що:

$$\mu = n_a, \quad (3.3)$$

де n_a – активна пористість.

6. Чому чисельно рівний коефіцієнт гравітаційної водовіддачі?

Для різних типів гірських порід коефіцієнт гравітаційної водовіддачі змінюється в межах від 0,001 до 0,3.

7. Що таке "коефіцієнт нестачі насичення" гірських порід?

Це є аналог коефіцієнта гравітаційної водовіддачі, що використовується при оцінці заповнення породи рідиною. Він є чисельно меншим, ніж коефіцієнт гравітаційної ємності.

8. Що означає поняття "пружна ємність" гірських порід?

Це здатність гірських порід поглинати, утримувати та віддавати деяку кількість рідини за рахунок пружних властивостей рідини та породи.

9. Що таке коефіцієнт "пружної ємності" гірської породи?

Коефіцієнт пружної ємності гірської породи β^* визначається таким чином:

$$\beta^* = n \cdot \beta_\epsilon + \beta_n, \quad (3.4)$$

де n – загальна пористість породи; β_ϵ – коефіцієнт пружного стиснення рідини; β_n – коефіцієнт пружного стиснення породи.

Величина β^* являє собою зміну об'єму рідини в одиниці об'єму породи при одиничній зміні напору.

10. Чому чисельно дорівнює коефіцієнт пружної ємності гірської породи?

для пісків – $\beta^* \approx (0.5 \div 5) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$;

для супісків і суглинків $\beta^* \approx 10^{-3} \div 10^{-4} \text{ м}^{-1}$;

для тріщинуватих порід $\beta^* \approx 10^{-5} \div 10^{-6} \text{ м}^{-1}$.

11. Що таке "коефіцієнт пружної водовіддачі" водоносного пласту?

Коефіцієнт пружної водовіддачі гірської породи μ^* визначається таким чином:

$$\mu^* = \Delta_\epsilon \cdot \beta^* \cdot m, \quad (3.5)$$

де Δ_ϵ – об'ємна маса рідини; m – потужність водоносного пласту.

За умови, що $\Delta \epsilon \approx 1$:

$$\mu^* \approx \beta^* \cdot m . \quad (3.6)$$

12. Яку розмірність мають коефіцієнт гравітаційної водовіддачі гірської породи та коефіцієнт пружної водовіддачі водоносного пласту?

Ці величини безрозмірні.

13. Яке співвідношення існує між коефіцієнтами пружної та гравітаційної водовіддачі гірських порід?

Виходячи з величини β^* , можна дійти висновку, що за реальних потужностей водоносних пластів чисельне значення μ^* буде на один-два порядки менше, ніж значення μ .

14. Що означає поняття "середовище з подвійною ємністю"?

В масивах тріщинуватих, або закарстованих порід переважають дрібні пори та тріщини, однак серед них може мати місце незначна кількість крупних пор і тріщин. Між всіма ними існує постійний водообмін. Подібна структура має назву "середовище з подвійною ємністю". В процесі водовідбору з такого середовища вода спочатку вивільнюється з крупних пор і тріщин (середовище 1), а потім із дрібних (середовище 2). Очевидно, що процес у середовищі 2 розвивається більш повільно, і ця система має більшу водовіддачу.

Додаткові запитання до теми:

1. Що таке "максимальна молекулярна вологоємність" гірських порід?
2. Чому коефіцієнт недостатчі насичення чисельно менший, ніж коефіцієнт гравітаційної водовіддачі?

Задача № 3.1

Визначити величину коефіцієнта гравітаційної водовіддачі за формулою П.А.Бецинського для порід із такими коефіцієнтами фільтрації:

- крупнозернистий пісок $K=50$ м/діб;
- середньозернистий пісок $K=25$ м/діб;
- дрібнозернистий пісок $K=5$ м/діб;
- супісок $K=0,5$ м/діб;
- суглинок $K=0,05$ м/діб.

З'ясувати, в яких межах зміни коефіцієнта фільтрації формула справедлива, якщо для даних порід дослідним шляхом встановлені такі значення коефіцієнта гравітаційної водовіддачі:

- крупнозернистий пісок $\mu = 0,3$;
- середньозернистий пісок $\mu = 0,2$;
- дрібнозернистий пісок $\mu = 0,15$;
- супісок $\mu = 0,1$;
- суглинок $\mu = 0,01$.

ТЕМА 4. ПОТОКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Поняття потоку підземних вод. Основні класифікації потоків підземних вод. Характеристика елементів потоків підземних вод і гідродинамічної сітки фільтрації. Поняття структури потоків підземних вод. Теоретичні основи математичної моделі, що описує процес фільтрації.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що являє собою поняття "басейн" у ДПВ?

У ДПВ поняття "басейн" означає зосередження в замкнутому пласті підземних вод при практичній відсутності їх руху. На практиці це протоки з дуже незначними ухилами та швидкістю фільтрації майже рівній нулю. Поняття "басейн підземних вод" у ДПВ є умовним.

2. Що означає поняття "потік" у ДПВ?

Це така гідрогеологічна структура, в якій підземні води перебувають у стані руху, гідродинамічний напір у різних місцях потоку різний.

3. Як класифікуються потоки підземних вод за гідралічними ознаками?

За гідралічними ознаками потоки поділяють на безнапірні, напірні, напірно-безнапірні.

4. Що таке "безнапірний потік" підземних вод?

Безнапірні (ґрунтові) потоки характеризуються тим, що в них верхньою межею є вільна поверхня води (потоки з вільною поверхнею).

5. Що таке "напірний потік" підземних вод?

Напірні потоки верхньою межею мають слабо проникний або непроникний пласт. Їх напірні властивості виявляються в тому, що при розкритті пласта підземні води піднімаються вище верхньої межі потоку – до рівня п'єзометричної поверхні підземних вод.

6. Що таке "напірно-безнапірний" потік підземних вод?

Напірно-безнапірними називаються такі напірні потоки, в окремих зонах яких утворюється вільна поверхня підземних вод, чи навпаки – такі безнапірні, в окремих зонах яких при розкритті пласта підземні води піднімаються вище верхньої межі потоку.

7. Як класифікуються потоки підземних вод за зміною їх елементів у просторі?

За зміною елементів потоків підземних вод у просторі потоки поділяють на рівномірні та нерівномірні.

8. Що таке "рівномірний потік" підземних вод?

Рівномірними називаються такі потоки підземних вод, швидкість яких не змінюється за протяжністю потоку.

9. Що таке "нерівномірний потік" підземних вод?

В нерівномірних потоках підземних вод швидкість змінюється за протяжністю потоку.

10. Як класифікуються потоки підземних вод за зміною їх елементів у часі?

За зміною елементів потоків підземних вод у часі потоки поділяють на усталені та неусталені.

11. Що таке "усталений потік" підземних вод?

Усталеними (стаціонарними) потоками підземних вод називаються такі потоки, в кожній точці яких їх гідродинамічні елементи є незмінними в часі.

12. Що таке "неусталений потік" підземних вод?

Неусталеними (нестационарними) потоками підземних вод називаються такі потоки, в кожній точці яких їх гідродинамічні елементи змінюються в часі.

13. Які межі потоків виділяються у ДПВ?

У ДПВ виділяють верхні, нижні, бокові, внутрішні межі.

14. Що можна вважати "верхньою межею" потоків підземних вод?

Верхньою межею потоків підземних вод можна вважати вільну поверхню ґрунтових вод, водотривкий або слабо проникний шар.

15. Що являє собою "нижня межа" потоків підземних вод?

Нижню межею потоків підземних вод можна вважати водотривкий або слабо проникний шар.

16. Що таке "бокові межі" потоків підземних вод?

Боковими межами потоків підземних вод є місця, де водоносний горизонт виклинується або розмитий, чи межує з водонепроникними породами (т. зв. геологічні межі). Також боковими межами можуть бути місця, де водоносний горизонт розвантажується чи живиться, наприклад, річка (т. зв. гідрогеологічні межі).

17. Що таке "внутрішня межа" потоків підземних вод?

Внутрішніми межами потоків підземних вод є річки, водойми, горизонтальні дрени, водозабірні свердловини, що розташовані в межах площі розповсюдження потоку.

18. Яка схематизація меж потоків характеризує їх різновидності в плані?

При схематизації меж потоків у плані потоки поділяють на необмежені, напівобмежені та обмежені.

19. Що таке "необмежені потоки" підземних вод?

Це такі потоки підземних вод, межі яких віддалені на значну відстань від місця, що розглядається, так, що будь-які зміни на межах не впливають на зміну характеристик потоку в даному місці.

20. Що таке "напівобмежені потоки" підземних вод?

Це такі потоки підземних вод, для яких одна з меж потоку фіксується у вигляді прямої лінії.

21. Які потоки підземних вод називаються обмеженими?

Це такі потоки підземних вод, межі яких чітко визначені.

22. Які види обмежених потоків виділяються у ДПВ?

У ДПВ виділяють такі обмежені потоки: пласт – смуга, пласт – кут, пласт – коло.

23. Що таке "гідродинамічні елементи" потоку підземних вод?

Гідродинамічні елементи потоку – це характеристичні величини, що несуть основну інформацію про потік підземних вод і повністю його визначають. Таких елементів нараховують п'ять.

24. Які існують гідродинамічні елементи потоку підземних вод?

Гідродинамічні елементи потоку підземних вод: гідродинамічний напір, градієнт напору, напрям руху потоку, швидкість фільтрації, фільтраційна витрата потоку.

25. Що таке гідродинамічний напір потоку?

Гідродинамічний напір визначається за такою залежністю:

$$H_d = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2 \cdot \gamma} . \quad (4.1)$$

26. Що таке "градієнт напору"?

Градієнт напору визначається за залежністю (2.6) або

$$I = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta H}{\Delta l} \right) = - \frac{\partial H}{\partial l} . \quad (4.2)$$

27. Як можна визначити напрям руху потоку підземних вод?

За трьома точками, в яких відомі значення гідродинамічного напору.

28. Що таке швидкість фільтрації підземних вод?

Швидкість фільтрації визначається за залежністю (2.5).

29. Що таке фільтраційна витрата потоку підземних вод?

Фільтраційна витрата визначається за залежністю (2.4).

30. Що таке "фільтраційний опір" потоку підземних вод?

Виходячи з (2.4) та (2.6), можна записати:

$$Q = K \cdot \varpi \cdot I = K \cdot b \cdot h \cdot \frac{\Delta H}{\Delta l} , \quad (4.3)$$

де b – ширина потоку підземних вод; h – потужність цього потоку.

Прийнявши, що:

$$T = K \cdot h , \quad (4.4)$$

$$\Phi = \frac{\Delta l}{K \cdot \varpi} = \frac{\Delta l}{K \cdot b \cdot h} = \frac{\Delta l}{T \cdot b} , \quad (4.5)$$

вираз для фільтраційної витрати потоку можна записати у такому вигляді:

$$Q = \frac{\Delta H}{\Phi} , \quad (4.6)$$

де Φ – фільтраційний опір потоку.

Фільтраційний опір являє собою відношення втрат напору до витрати потоку і залежить від геометричних розмірів ділянки потоку та коефіцієнту фільтрації.

31. Що таке "коефіцієнт водопровідності потоку"?

Коефіцієнт водопровідності T являє собою добуток коефіцієнта фільтрації та потужності потоку. Визначається за залежністю (4.4).

32. Яку розмірність має коефіцієнт водопровідності?

Розмірність коефіцієнту водопровідності кв. м/діб.

33. Що таке "гідродинамічна сітка фільтрації"?

Оскільки гідродинамічні елементи потоку підземних вод є різними в різних його точках, для характеристики потоку в цілому використовують гідродинамічну сітку.

Гідродинамічною сіткою фільтрації називається креслення, що складається з ліній рівних гідродинамічних напорів, проведених із заданим інтервалом, та ліній току, що вказують напрям руху потоку у кожній точці. Також частина гідродинамічної сітки фільтрації, що міститься між сусідніми лініями току, що проведені між межами області фільтрації, називається стрічкою току. Клітинку сітки утворює перетин двох сусідніх ліній рівних гідродинамічних напорів і двох сусідніх ліній токів.

34. З яких елементів складається гідродинамічна сітка фільтрації?

Гідродинамічна сітка складається з ліній рівних гідродинамічних напорів, ліній току, клітинок і стрічок току.

35. За якими правилами будується гідродинамічна сітка фільтрації?

Гідродинамічна сітка фільтрації будується з врахуванням таких правил (правила одночасно є й основними властивостями гідродинамічної сітки):

а) лінії рівних гідродинамічних напорів і лінії току завжди взаємно ортогональні;

б) втрати гідродинамічного напору в кожній клітинці гідродинамічної сітки фільтрації мають бути однаковими;

б) через будь-яку клітинку гідродинамічної сітки фільтрації проходить однакова витрата потоку.

36. Що характеризує гідродинамічна сітка фільтрації?

Гідродинамічна сітка характеризує усталений потік підземних вод (його гідродинамічні елементи) або неусталений потік (його гідродинамічні елементи) на певний момент часу.

37. Що таке "властивість конформності" гідродинамічної сітки фільтрації?

За умови сталого коефіцієнту водопровідності T відношення ширини клітинки сітки до її довжини є постійною величиною.

38. Що таке "структура потоку" підземних вод?

Структурую потоку підземних вод називається розподіл у потоці гідродинамічних напорів, швидкостей та інших гідродинамічних елементів, який залежить від особливостей руху підземних вод. У формуванні потоків велике значення відіграє будова водовмісної товщі, від якої залежить зміна її водопроникності.

39. Які основні фактори впливають на формування структури потоку підземних вод?

Це такі фактори, як: ступінь водонасиченості гірських порід, умови живлення та розвантаження потоку, характер залягання водовмісних порід, фільтраційні властивості порід, форма та характер меж потоку.

40. Які основні типи потоків виділяють залежно від характеру водопроникності пластів?

Однорідні, шматково-однорідні, однорідно-шаруваті, неоднорідно-шаруваті.

41. Що таке "однорідні" потоки підземних вод?

Однорідні потоки пов'язані з пластами однорідної будови, водопроникність яких у розрізі та за довжиною потоку майже не змінюється.

42. Що таке "шматково-однорідні (шматково-неоднорідні)" потоки підземних вод?

Шматково-однорідні потоки характеризуються тим, що за довжиною таких потоків виділяються зони з різною водопроникністю, проте в межах кожної з таких зон потоки є однорідними.

43. Які потоки підземних вод називаються "однорідно-шаруватими"?

Однорідно-шаруваті потоки приурочені до пластів шаруватої будови; водопроникність (коефіцієнти фільтрації) шарів таких потоків відрізняється не більш ніж у 20 разів.

44. Які потоки підземних вод називаються "неоднорідно-шаруватими"?

Неоднорідно-шаруваті потоки приурочені до пластів шаруватої будови; водопроникність (коефіцієнти фільтрації) шарів таких потоків відрізняється більш ніж у 20 разів (характерним є сусідство проникних і слабо проникних шарів).

45. Яку мірність течії мають реальні потоки підземних вод?

Всі реальні потоки, що розглядаються в прямокутній системі координат, є просторовими (тримірними).

46. Які потоки підземних вод по мірності течії розглядаються в ДПВ?

Умовно по мірності течії в ДПВ виділяють такі потоки: лінійні (одномірні), площинні (двомірні), просторові (тримірні)

47. Які потоки підземних вод вважаються лінійними (одномірними)?

Це потоки, для яких переважаючим є напрям руху рідини вздовж однієї з координатних осей.

48. Які потоки підземних вод вважаються площинними (двомірними)?

Це потоки, для яких переважаючим є рух рідини вздовж двох координатних осей (рух відбувається паралельно деякій площині).

49. Як класифікують двомірні потоки підземних вод?

Виділяють площинно-горизонтальні (планові) потоки та площинно-вертикальні (профільні) потоки.

50. Що таке "площинно-горизонтальний" потік підземних вод?

Це потік підземних вод, рух якого відбувається переважно в горизонтальній площині.

51. Що таке "площинно-вертикальний" потік підземних вод?

Це потік підземних вод, рух якого відбувається переважно у вертикальній площині.

52. Що таке "планово-просторовий" потік підземних вод?

Це потік підземних вод, приурочений до пластів неоднорідно-шаруватої будови при чергуванні водопроникних і слабо проникних шарів. Рух рідини у водопроникних шарах розглядається у горизонтальній площині, у слабо проникних – у вертикальній. За рахунок цього відбувається перетік рідини через слабо проникний шар з одного водопроникного шару до іншого. Це так звана передумова перетікання (передумова Мятієва – Гірінського).

53. Які середовища називають ізотропними та анізотропними?

Якщо водопроникність порід (коефіцієнт фільтрації) у всіх напрямках однакова, то середовище називається однорідним (ізотропним). Якщо водопроникність порід (коефіцієнт фільтрації) різна у різних напрямках, то середовище називається анізотропним.

Задача № 4.1

На основі роздавального матеріалу класифікувати потоки підземних вод, які зображені на рисунках, за гідравлічними властивостями.

Задача № 4.2

На основі схеми роздавального матеріалу визначити:

1. Гідродинамічний напір у точках А та В.
2. Швидкість фільтрації за лінією А – В.
3. Витрати потоку за лінією С – D.

Задача № 4.3

На основі роздавального матеріалу класифікувати потоки підземних вод, які зображені на рисунках за характером водопроникності пластів.

ТЕМА 5. ВИХІДНІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ

Поняття про застосування фундаментальних рівнянь математичної фізики в ДПВ. Поняття про жорсткий і пружний режими фільтрації. Отримання рівняння нерозривності та рівняння фільтрації на базі понять про струменисту модель руху рідини та закони фільтрації підземних вод.

Головні питання та відповіді теми:

1. Які природні сили обумовлюють явище фільтрації води крізь гірські породи?

Явище фільтрації обумовлюють:

- ◆ сила тяжіння та тиску рідини, що обумовлені висотою положення та п'єзометричною висотою;
- ◆ сили інерції, що визначаються величиною швидкісного напору;
- ◆ сили пружності рідини та фільтруючої породи, що виникають при зміні тиску у водоносному горизонті.

2. Які сили протидіють процесу фільтрації води крізь гірські породи?

Процесу фільтрації протидіють:

- ◆ сили внутрішнього тертя, що обумовлені в'язкістю рідини;
- ◆ сили зовнішнього тертя, що обумовлені наявністю системи "рідина – порода".

3. Що таке "жорсткий режим" фільтрації?

Це такий режим фільтрації однорідної, слабо мінералізованої рідини, в формуванні якого вплив сил інерції та пружності настільки незначний, що ними нехтують, а в'язкість настільки мала, що нехтують і силами внутрішнього тертя. При цьому фільтрація відбувається в ізотермічних умовах.

4. Що взято за основу виводу рівняння нерозривності?

Отримання вихідних диференціальних рівнянь фільтрації починається з одержання рівняння нерозривності просторового фільтраційного потоку. Для цього виділяють нескінченно малий елемент простору і розглядають для нього баланс ваги рідини протягом нескінченно малого часу dt .

5. Який вигляд має рівняння нерозривності?

Виходячи з необхідності додержання умов балансу ваги рідини, отримуємо таке рівняння:

$$-\left(\frac{\partial}{\partial x} \gamma v_x + \frac{\partial}{\partial y} \gamma v_y + \frac{\partial}{\partial z} \gamma v_z\right) dx dy dz dt = \frac{\partial}{\partial t} \gamma n dx dy dz dt, \quad (5.1)$$

де γ – питома вага рідини; v_x, v_y, v_z – швидкості фільтрації у напрямках X,Y,Z; x, y, z – просторові координати; t – час; n – коефіцієнт активної пористості.

Після скорочення нескінченно малих маємо:

$$\frac{\partial}{\partial x} \gamma v_x + \frac{\partial}{\partial y} \gamma v_y + \frac{\partial}{\partial z} \gamma v_z + \frac{\partial}{\partial t} \gamma n = 0, \quad (5.2)$$

це і є рівняння нерозривності.

Якщо питома вага рідини є величиною сталою ($\gamma = const$), рівняння нерозривності має вигляд:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial n}{\partial t} = 0. \quad (5.3)$$

6. В чому полягає зміст рівняння фільтрації?

Рівняння фільтрації потоку визначає розподіл у потоці гідродинамічних напорів. Таке рівняння можна отримати на базі рівняння нерозривності, якщо пов'язати величини швидкості у рівнянні нерозривності з гідродинамічним напором. При цьому, звичайно, використовується залежність, що визначає основний закон фільтрації (закон Дарсі).

7. Який вигляд має рівняння жорсткого режиму фільтрації?

При жорсткому режимі фільтрації зневажають деформацією гірської породи та рідини, тому $\frac{\partial \gamma n}{\partial t} = 0$.

За умови, що $\gamma = const$, маємо:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5.4)$$

Складові швидкості фільтрації пов'язані з гідродинамічним напором відповідно до основного закону фільтрації, а саме:

$$v_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x}; \quad v_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y}; \quad v_z = -K_z \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (5.5)$$

де K_x, K_y, K_z – коефіцієнти фільтрації у напрямках осей координат.

Тому рівняння жорсткого режиму фільтрації має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0. \quad (5.6)$$

8. Який вигляд має рівняння жорсткого режиму фільтрації для однорідно-ізотропних пластів?

У випадку, якщо водоносний пласт однорідно-ізотропний (коли $K_x = K_y = K_z = K = const$), таке рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0. \quad (5.7)$$

Останнє рівняння відповідає рівнянню Лапласа, яке є одним із відомих рівнянь математичної фізики. Функція, що відповідає цьому рівнянню, має назву гармонічної (потенціальної).

9. Який вигляд має рівняння жорсткого режиму фільтрації для однорідно-анізотропних (шматково-однорідних) пластів?

Якщо пласт є однорідно-анізотропним або шматково-однорідним (коли $K_x \neq K_y \neq K_z$), рівняння жорсткого режиму фільтрації має вигляд:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0. \quad (5.8)$$

10. Справедливі чи ні рівняння жорсткого режиму фільтрації для неусталених потоків підземних вод?

При отриманні рівнянь не накладались обмеження відносно стаціонарності течії. Тому ці рівняння справедливі як для стаціонарного (усталеного) потоку, так і для нестаціонарного (неусталеного) потоку. Проте слід звернути увагу, що в рівняннях похідні за часом відсутні.

11. Як записується рівняння нерозривності для пружного режиму фільтрації?

При отриманні рівняння нерозривності для пружного режиму фільтрації слід враховувати складову рівняння нерозривності $\frac{\partial \gamma n}{\partial t}$. Деформація розглядається як пружна, тому застосовується поняття коефіцієнта пружної ємності гірської породи β^* .

Якщо $\gamma = const$,

$$\frac{\partial \gamma n}{\partial t} = \gamma \beta^* \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.9)$$

Тоді рівняння нерозривності має вигляд:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \beta^* \frac{\partial H}{\partial t} = 0. \quad (5.10)$$

12. Як перейти від рівняння нерозривності до рівняння пружного режиму фільтрації?

З врахуванням закону Дарсі ($v_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x}$, $v_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y}$, $v_z = -K_z \frac{\partial H}{\partial z}$),

рівняння пружного режиму фільтрації отримує такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial H}{\partial z}) = \beta^* \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.11)$$

13. Який вигляд має рівняння пружного режиму фільтрації для шматково-однорідних або однорідно-анізотропних пластів?

Якщо пласт є шматково-однорідним або однорідно-анізотропним, рівняння має вигляд:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \beta^* \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.12)$$

14. Який вигляд має рівняння пружного режиму фільтрації для однорідно-ізотропних пластів?

У випадку, коли водоносний пласт є однорідно-ізотропним (коли $K_x = K_y = K_z = K = const$), рівняння набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\beta^*}{K} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.13)$$

Це рівняння відповідає рівнянню Фур'є (рівнянню теплопровідності), відомому з математичної фізики.

15. Як у рівнянні пружного режиму фільтрації враховуються водопроникні властивості водовмісної породи?

Можна записати рівняння Фур'є у такому вигляді:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\beta^* m}{Km} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (5.14)$$

де m – потужність потоку.

Відомо, що $\beta^* m = \mu^*$, де μ^* – коефіцієнт пружної водовіддачі пласту; відповідно $Km = T$, де T – коефіцієнт водопровідності пласту. Тому рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{\mu^*}{T} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.15)$$

За пропозицією В.Щелкачова застосовується поняття "коефіцієнту п'єзопровідності" a_n :

$$a_n = \frac{T}{\mu^*}. \quad (5.16)$$

Коефіцієнт п'єзопровідності визначає характер розвитку процесу пружного режиму фільтрації у часі, має таку ж саму розмірність, як і коефіцієнт водопровідності.

16. Який вигляд має рівняння пружного режиму фільтрації при застосуванні коефіцієнта п'єзопровідності?

Рівняння має такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{1}{a_n} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5.17)$$

Задача № 5.1

Привести рівняння жорсткого режиму фільтрації для однорідно-анізотропних (шматково-однорідних) пластів до вигляду рівняння Лапласа методом лінійного перетворення координат.

ТЕМА 6. ОСНОВНІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ПЛАНОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Зв'язок вихідних диференціальних рівнянь фільтрації з реальними природними умовами. Поняття планової фільтрації та умови, що дають змогу застосувати це поняття. Рівняння фільтрації для основних типів планових потоків підземних вод.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що таке планова фільтрація?

Плановою називають таку фільтрацію, коли можна знехтувати рухом рідини у вертикальному напрямі ($\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$). В реальних природних умовах при віддаленні від меж області фільтрації лінії рівних напорів у розрізі стають все більше вертикальними, а лінії току все більше горизонтальними. Тому на деякій відстані від меж області фільтрації потік можна розглядати як плановий. Суттєві відхилення від планової фільтрації спостерігаються лише на відстані від межі потоку, яка не перевищує його потужність.

2. У чому полягає суть передумови Дюпюї?

Французький гідралік Дюпюї перший звернув увагу на те, що природні гідрогеологічні об'єкти зазвичай мають значно більші розміри в плані порівняно з їхньою потужністю. Суттєві відхилення від планової фільтрації спостерігаються лише на відстані від межі потоку, яка не перевищує його потужність. Тому реальний тримірний фільтраційний потік можна розглядати з практичної позиції як двомірний (плановий). Відповідно у диференціальних рівняннях фільтрації мають місце дві просторові координати замість трьох, що значно полегшує розв'язання таких рівнянь. Уявлення про незначну потужність фільтраційного потоку порівняно з його іншими лінійними розмірами, що дає змогу розглядати реальні тримірні природні потоки як планові, має назву передумови Дюпюї.

3. Які водоносні пласти розглядаються в теорії планової фільтрації?

В теорії планової фільтрації розглядаються такі водоносні пласти:

- ◆ ізольований напірний пласт (верхня та нижня межі такого пласту складаються водотривкими породами);
- ◆ напірний пласт за наявності перетікання (верхня або (та) нижня межі такого пласту складаються слабо проникними породами);
- ◆ безнапірний пласт (верхня межа такого пласту – це вільна поверхня рівня підземних вод, нижня межа складена водотривкими або слабо проникними породами).

4. Які особливості виникають при отриманні рівняння нерозривності для планової фільтрації в ізольованому напірному пласті?

Виникають дві особливості:

- ◆ рух рідини по вертикалі відсутній ($\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$);

◆ при виводі рівняння нерозривності розглядається елемент простору, що має нескінченно малу площу та висоту m , що дорівнює потужності водоносного пласту).

5. Який вигляд має рівняння нерозривності для жорсткого режиму при плановій фільтрації?
За умови, що $\gamma = const$, рівняння нерозривності має такий вигляд:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (6.1)$$

6. Який вигляд має рівняння жорсткого режиму при плановій фільтрації в напірному ізольованому пласті?

Рівняння жорсткого режиму при плановій фільтрації в напірному ізольованому пласті має такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial H}{\partial y}) = 0. \quad (6.2)$$

За умови, що такий водоносний пласт є однорідним, тобто $T_x = T_y = T = const$, рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0. \quad (6.3)$$

7. Який вигляд має рівняння пружного режиму при плановій фільтрації в напірному ізольованому пласті?

Рівняння пружного режиму при плановій фільтрації в напірному ізольованому пласті має такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial H}{\partial y}) = \mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.4)$$

За умови, що водоносний пласт є однорідним, тобто $T_x = T_y = T = const$, рівняння набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{1}{a_n} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.5)$$

8. В чому полягають особливості отримання рівняння нерозривності для напірних пластів за наявності перетікання?

Перетікання з одного водоносного горизонту до іншого можливе у випадку, коли ці горизонти розділяє слабо проникний (роздільний) шар. За наявності перетікання, наприклад зверху, враховується додатковий об'єм рідини, що надходить до виділеного розрахункового елемента через його верхню грань. При цьому приймається до уваги передумова перетікання (Мятієва – Гринського), а ємнісні властивості роздільного шару не враховуються.

9. Як визначається додатковий об'єм рідини, що надходить у виділений елемент за рахунок перетікання?

Додатковий об'єм рідини визначається за залежністю:

$$\varepsilon_{II} = K_p \frac{H' - H}{m_p}, \quad (6.6)$$

де K_p – коефіцієнт фільтрації роздільного шару; H' , H – гідродинамічні напори в сусідніх водоносних шарах; m_p – потужність роздільного шару.

10. Який вигляд має рівняння нерозривності для напірного потоку за наявності перетікання?

Рівняння нерозривності для напірного потоку за наявності перетікання має такий вигляд:

$$\frac{\partial(mv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(mv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(mn)}{\partial t} + \varepsilon_{II} = 0. \quad (6.7)$$

11. Як можна перейти від рівняння нерозривності до рівняння фільтрації для напірного пласта за наявності перетікання?

Якщо врахувати, що потік має незмінну потужність ($m = const$), пласт є однорідним та ізотропним ($K = const$), режим течії є ламінарним ($v = KI$), то, виходячи з (6.7), можна отримати таке рівняння фільтрації:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{K_p}{m_p T} (H' - H) = \frac{1}{a_n} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.8)$$

12. Що таке "фактор перетікання" та "показник перетікання"?

Поняття фактору перетікання (B) застосовується з метою спрощення запису рівняння фільтрації для пластів за наявності перетікання:

$$B = \sqrt{\frac{Tm_p}{K_p}}. \quad (6.9)$$

Тоді рівняння фільтрації буде мати такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{H' - H}{B^2} = \frac{1}{a_n} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.10)$$

Показник перетікання (b) визначається таким чином:

$$b = \frac{1}{B} = \sqrt{\frac{K_p}{Tm_p}}. \quad (6.11)$$

Тоді рівняння фільтрації буде мати такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + b^2 (H' - H) = \frac{1}{a_n} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.12)$$

13. Які особливості слід враховувати при отриманні рівняння планової фільтрації для безнапірного пласта?

Особливістю безнапірної фільтрації є те, що при зміні розташування вільної поверхні підземних вод (депресійної поверхні) потужність потоку h також змінюється. Тому в розрахунковий елемент потоку надходить (вилучається з елементу) додатковий об'єм рідини, який обумовлений гравітаційною водовіддачею. Крім того, у безнапірний пласт зверху надходить рідина за рахунок інфільтрації (або втрачається за рахунок випаровування). Питому величину інфільтраційного живлення (на одиницю площі за одиницю часу, так звану інтенсивність інфільтраційного живлення) позначають як W .

14. Як визначається додатковий об'єм рідини, що надходить за рахунок гравітаційної водовіддачі?

Якщо швидкість зниження (підвищення) депресійної поверхні дорівнює $\frac{\partial h}{\partial t}$, то об'єм додаткового живлення на одиницю площі потоку за одиницю часу дорівнює:

$$\varepsilon_r = -\mu \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (6.13)$$

де μ – коефіцієнт гравітаційної водовіддачі.

15. Який вигляд має рівняння нерозривності для безнапірного пласта?

За умови, що $\gamma = const$, рівняння нерозривності має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x}(hv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_y) + \frac{\partial}{\partial t}(hn) = \varepsilon_r + W. \quad (6.14)$$

16. Як перейти від рівняння нерозривності до рівняння фільтрації для умов безнапірного пласта (до рівняння Буссінеска)?

Використовуючи залежність для виразу швидкості фільтрації згідно із законом Дарсі та враховуючи відповідні особливості, маємо таке рівняння фільтрації:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y h \frac{\partial H}{\partial y}) + W = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (6.15)$$

де μ^* – коефіцієнт пружної водовіддачі безнапірного пласту.

Відомо, що для безнапірної фільтрації є характерними малі ухили депресійної поверхні, тому можна прийняти, що:

$$\frac{\partial H}{\partial t} \approx \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (6.16)$$

Крім того, для безнапірних пластів $\mu \gg \mu^*$.

Ці умови дозволяють спростити рівняння фільтрації до вигляду:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y h \frac{\partial H}{\partial y}) + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.17)$$

Якщо пласт є однорідним та ізотропним ($K = const$):

$$\frac{\partial}{\partial x}(h \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{W}{K} = \frac{\mu}{K} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.18)$$

Це рівняння у випадку, що $W = 0$, вперше отримано Буссінеском, тому має назву рівняння Буссінеска.

17. В чому полягають особливості рівняння Буссінеска з позиції його розв'язання?

Зауважимо, що у рівнянні Буссінеска шуканою функцією є гідродинамічний напір $H(x, y, t)$. Але коефіцієнти при похідних (h) у лівій частині рівняння залежать від шуканої функції (H). Такого не було у рівняннях напірної фільтрації, де потужність потоку не залежить від змін гідродинамічного напору. Рівняння такого типу, як рівняння Буссінеска, має назву нелінійного рівняння. Нелінійні рівняння складно розв'язувати, тому для аналітичного розв'язання рівняння Буссінеска спочатку лінеаризують.

18. Що таке лінеаризація нелінійного рівняння?

Лінеаризація – це заміна нелінійного рівняння на подібне йому лінійне, із застосуванням при цьому спеціальних прийомів і умов.

19. Які існують способи (методи) лінеаризації рівняння Буссінеска?

Існує два способи лінеаризації рівняння Буссінеска.

Перший спосіб запропонований Буссінеском. Припустимо, що $h = h_{cep}$, де h_{cep} – деяка середня потужність потоку. Тоді рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{W}{Kh_{cep}} = \frac{\mu}{Kh_{cep}} \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6.19)$$

Другий спосіб запропонований Багровим і Верігіним. Необхідними умовами його застосування є:

- ◆ наявність горизонтального водотривкого шару як нижнього водотриву;
- ◆ обрана поверхня порівняння має збігатися з цим водотривким шаром.

В такому випадку $H = h$. Проте:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \left(\frac{h^2}{2} \right)}{\partial x^2}. \quad (6.20)$$

Тоді рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \left(\frac{h^2}{2} \right)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \left(\frac{h^2}{2} \right)}{\partial y^2} + \frac{W}{K} = \frac{\mu}{Kh_{cep}} \frac{\partial \left(\frac{h^2}{2} \right)}{\partial t}. \quad (6.21)$$

Тут теж застосовується поняття h_{cep} , але похибка від осереднення тут менша, ніж при застосуванні першого способу.

Як бачимо, рівняння є лінійним відносно $\frac{h^2}{2}$. Тому другий спосіб лінеаризації має ще назву лінеаризації щодо квадрата шуканої функції.

20. Що таке коефіцієнт водопровідності?

Коефіцієнт водопровідності потоку (T) визначається як добуток коефіцієнта фільтрації (K) та потужності потоку (m або h).

21. Що таке коефіцієнт рівнепровідності?

За аналогією з коефіцієнтом п'єзопровідності у напірному пласті, для безнапірного пласту застосовується поняття коефіцієнта рівнепровідності:

$$a_p = \frac{T}{\mu}, \quad (6.22)$$

де μ – коефіцієнт гравітаційної водовіддачі.

22. Який висновок можна зробити, проаналізувавши рівняння планової фільтрації для різних потоків?

Слід звернути увагу на те, що в результаті лінеаризації рівняння безнапірної фільтрації отримують рівняння, яке є формально ідентичним (математично еквівалентним) рівнянню напірної фільтрації. Наявність інфільтраційного жив-

лення не є принциповим фактом, бо існує аналогія між інфільтраційним живленням та перетіканням при напірній фільтрації.

Математична еквівалентність кінцевих рівнянь напірної та безнапірної фільтрації дозволяє в подальшому розглядати головним чином рівняння напірної фільтрації, а висновки відносно безнапірної фільтрації робити за аналогією.

Задача № 6.1

На основі роздавального матеріалу визначити, які потоки та в яких умовах описуються наведеними диференціальними рівняннями планової фільтрації.

ТЕМА 7. МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ФІЛЬТРАЦІЇ

Аналіз диференціальних рівнянь фільтрації. Визначення понять крайових, початкових та граничних умов. Методичні підходи до розв'язання задач фільтрації.

Головні питання та відповіді теми:

1. Як з математичної позиції характеризуються рівняння фільтрації?

Розглянуті в попередніх темах диференціальні рівняння фільтрації підземних вод належать до лінійних чи нелінійних рівнянь у частинних похідних (рівнянь математичної фізики) другого порядку, еліптичного типу (для усталеного режиму фільтрації) чи параболічного типу (для пружного режиму фільтрації).

2. Які рівняння називаються лінійними та нелінійними?

Параметри лінійних рівнянь залежать лише від координат простору та часу, а параметри нелінійних рівнянь залежать ще від значень шуканої функції.

3. Що означає поняття "параметр" у рівняннях фільтрації підземних вод?

Параметр взагалі – це величина, що характеризує певну властивість деякого явища. Основними фізичними властивостями пористого середовища, що визначають умови руху в ньому рідини, є пористість і проникність. Тому основні параметри водоносного горизонту (отже, рівнянь фільтрації) мають відображати ці властивості водовмісної породи, тобто її ємнісні та фільтраційні властивості.

4. Що являють собою коефіцієнти рівнянь фільтрації з позиції математичної моделі?

Це коефіцієнти в рівняннях фільтрації, що пов'язують диференціальне рівняння з певними природними умовами, в яких відбувається процес фільтрації.

5. Які існують групи методів для розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації?

Існує три групи методів: аналітичні, методи аналогового моделювання та числові методи розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації.

6. Що необхідно задати для розв'язання диференціального рівняння, що описує конкретний процес фільтрації?

Для цього необхідно задати межі інтегрування. По відношенню до опису процесу фільтрації це буде початковий стан процесу (початкова умова) та

умови на межах області фільтрації (граничні умови). В сукупності початкова та граничні умови формують так звані крайові умови.

7. Що практично означають поняття "початкові умови" та "граничні умови" фільтраційних потоків?

Початкові умови відображають стан потоку в момент перед початком процесу неусталеної фільтрації, це значення шуканої функції (наприклад, гідродинамічного напору H) в початковий (нульовий) момент часу.

Граничні умови характеризують величини шуканої функції (гідродинамічних напорів або витрат потоку) на всіх межах пластів – бокових, нижній, верхній і внутрішніх.

8. Що таке "крайова задача" для процесу фільтрації?

Крайова задача – це сукупність диференціального рівняння фільтрації та крайових умов для конкретного фільтраційного потоку.

9. Що означає поняття "гранична умова I роду"?

Спрощений математичний запис граничної умови I роду:

$$H_{\Gamma} = f(t), \quad (7.1)$$

окремий випадок

$$H_{\Gamma} = const, \quad (7.2)$$

де H_{Γ} – гідродинамічний напір на межі області фільтрації; t – час.

Наприклад, така умова виникає на бокових межах, де водоносний горизонт контактує з іншим, більш водозбагаченим, горизонтом або річкою.

10. Що означає поняття "гранична умова II роду"?

Спрощений математичний запис граничної умови II роду:

$$q_{\Gamma} = f(t), \quad (7.3)$$

окремі випадки

$$q_{\Gamma} = const, \quad (7.4)$$

$$q_{\Gamma} = 0$$

де q_{Γ} – питома витрата потоку на межі області фільтрації; t – час.

11. Що означає поняття "гранична умова III роду"?

Спрощений математичний запис граничної умови III роду:

$$q_{\Gamma} = f(H_p - H_{\Gamma}), \quad (7.5)$$

де q_{Γ} – питома витрата потоку на межі області фільтрації; H_p – гідродинамічний напір на зовнішній межі (річка, інший водоносний горизонт); H_{Γ} – гідродинамічний напір на межі області фільтрації.

12. Що означає поняття "граничні умови IV роду"?

Спрощений математичний запис граничної умови IV роду:

$$\begin{cases} H_{\Gamma 1} = H_{\Gamma 2}, \\ q_{\Gamma 1} = q_{\Gamma 2}, \end{cases} \quad (7.6)$$

де $H_{\Gamma 1}$ та $H_{\Gamma 2}$ – гідродинамічні напори по обидві боки межі; $q_{\Gamma 1}$ та $q_{\Gamma 2}$ – питома витрати потоку по обидві боки межі.

13. Які граничні умови можуть існувати на нижній межі потоків?

На нижній межі потоків може мати місце гранична умова II роду ($q = 0$), якщо нижня межа складена водотривкими породами, а також гранична умова III роду, якщо має місце перетікання із сусіднього водоносного горизонту.

14. Які граничні умови можуть існувати на верхній межі потоків?

На верхній межі напірних потоків може мати місце гранична умова II роду ($q = 0$), якщо верхня межа складена водотривкими породами, а також гранична умова III роду, якщо має місце перетікання із сусіднього водоносного горизонту. Якщо верхня межа потоку являє собою поверхню рівня ґрунтових вод (вільну поверхню, безнапірний потік), то має місце гранична умова II роду ($q = 0, q = f(t), q = const$), яка залежить від величин інфільтраційного живлення та випаровування з поверхні ґрунтових вод.

15. Які граничні умови можуть існувати на внутрішніх межах потоків?

Тут можуть мати місце гранична умова I роду (наприклад, заданий рівень води у дрени, озері, колодязі), гранична умова II роду (наприклад, заданий дебіт свердловини) та гранична умова IV роду (наприклад, контакт зон із різною водопроникністю).

Додаткові запитання до теми:

1. Які існують методи розв'язання крайових задач фільтрації?
2. Яким вимогам має відповідати крайова задача фільтрації?

Задача № 7.1

На основі роздавального матеріалу визначити граничні умови для наведених схем потоків підземних вод.

ТЕМА 8. АНАЛІТИЧНІ РОЗРАХУНКИ УСТАЛЕНИХ ОДНОМІРНИХ ПОТОКІВ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Поняття одномірного потоку. Основні розрахункові схеми усталених одномірних потоків підземних вод. Отримання розрахункових залежностей для основних схем усталених одномірних потоків підземних вод.

Головні питання та відповіді теми:

1. В яких випадках допускається схематизація, що дозволяє розглядати потоки як одномірні?

Якщо ширина стрічки току в напрямі течії не змінюється, або практично не змінюється, тоді в межах такої стрічки фільтраційний потік можна розглядати як одномірний. За розрахунковий елемент одномірних потоків приймається смуга шириною 1 м. Витрата потоку в межах цієї смуги називається питомою

витратою потоку (q), розмірність питомої витрати – куб. м/(діб·м) або (кв. м/діб). Такі умови спостерігаються на вододілах (водоносний пласт-смуга), поблизу прямолінійних берегів річок і водосховищ (водоносний напівобмежений пласт).

2. Які основні розрахункові схеми усталених одномірних потоків існують?

Існують три основних розрахункових схеми усталених одномірних потоків:

- ◆ напірний потік зі сталою водопровідністю ($T = const$);
- ◆ однорідний безнапірний потік ($K = const$) на горизонтальному водотриві (схема Дюпюї);
- ◆ горизонтальний однорідно-шаруватий потік (схема Грінського).

3. Який вигляд має диференціальне рівняння фільтрації для одномірного напірного потоку зі сталою водопровідністю?

В цілому рівняння планової фільтрації напірного ізольованого потоку має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = 0, \quad (8.1)$$

за умови, що $T = const$,

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{W}{T} = 0, \quad (8.2)$$

за умови, що потік є одномірним, рівняння має вигляд:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{W}{T} = 0. \quad (8.3)$$

4. Який вигляд має диференціальне рівняння фільтрації для одномірного однорідного безнапірного потоку на горизонтальному водотриві (для схеми Дюпюї)?

В цілому рівняння планової фільтрації безнапірного потоку має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = 0. \quad (8.4)$$

Таке рівняння для однорідного потоку ($K = const$), лінеаризоване за методом Багрова-Верігіна, має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \frac{h^2}{2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \frac{h^2}{2}}{\partial y^2} + \frac{W}{K} = 0. \quad (8.5)$$

Відповідно для одномірного потоку рівняння має вигляд:

$$-\frac{d^2 \frac{h^2}{2}}{dx^2} + \frac{W}{K} = 0. \quad (8.6)$$

5. Який вигляд має диференціальне рівняння фільтрації для одномірного горизонтального однорідно-шаруватого потоку (для схеми Грінського)?

Для такого потоку запропонована так звана "функція Грінського":

$$dG = Tdh. \quad (8.7)$$

Рівняння планової фільтрації в цьому випадку має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = 0. \quad (8.8)$$

За умови, що $H = h$:

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right) + W = 0. \quad (8.9)$$

Для одномірного потоку рівняння отримує вигляд:

$$\left(\frac{d^2 G}{dx^2} \right) + W = 0. \quad (8.10)$$

6. Для чого використовується функція Гірінського?

Функція Гірінського використовується для "зведення" однорідно-шаруватого потоку до однорідного.

7. Як визначається функція Гірінського?

Виходячи з (8.7), функція Гірінського може бути визначена за залежністю:

$$G_i = \int_0^h K(z)(h-z)dz. \quad (8.11)$$

Практичне визначення функції Гірінського здійснюється за такою формулою:

$$G = \sum_{i=1}^n K_i m_i (h_{II} - z_i) = K_1 m_1 (h_{II} - z_1) + K_2 m_2 (h_{II} - z_2) + \dots \\ \dots + K_n m_n (h_{II} - z_n), \quad (8.12)$$

де K_i – коефіцієнт фільтрації i -го шару однорідно-шаруватого потоку; m_i – потужність i -го шару однорідно-шаруватого потоку; h_{II} – повна потужність потоку в розрахунковому перерізі; z_i – відстань від середини i -го шару однорідно-шаруватого потоку до водотриву; n – кількість шарів однорідно-шаруватого потоку.

8. Якого висновку можна дійти, порівнявши диференційні рівняння для основних розрахункових схем усталених одномірних потоків?

При зіставленні рівнянь для основних розрахункових схем усталених одномірних потоків можна дійти висновку, що рівняння математично однотипні за формою. Тому можна визначити правила переходу від однієї до інших розрахункових схем потоків. Виконавши розв'язання диференціального рівняння для напірного потоку зі сталою водопровідністю та маючи правила переходу, можна отримати розв'язки для інших розрахункових схем потоків.

9. Які існують правила (умови) переходу від схеми напірного потоку зі сталою водопровідністю до схем Дюпюї та Гірінського?

Для переходу до схеми Дюпюї виконують таку заміну:

$$T \rightarrow K, \\ H \rightarrow \frac{h^2}{2}. \quad (8.13)$$

Для переходу до схеми Гірінського виконують таку заміну:

$$\begin{aligned} T &\rightarrow 1, \\ H &\rightarrow G. \end{aligned} \quad (8.14)$$

10. Яким шляхом виконується розв'язання диференційного рівняння фільтрації для одномірного потоку зі сталою водопровідністю?

Такий потік описується рівнянням (8.3). Це звичайне диференціальне рівняння, яке розв'язується шляхом інтегрування.

11. Як визначається гідродинамічний напір у заданій точці одномірного потоку зі сталою водопровідністю?

Після першого інтегрування рівняння (8.3) отримуємо:

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{W}{T}x + C_1. \quad (8.15)$$

Після другого інтегрування отримуємо вираз для гідродинамічного напору:

$$H_x = -\frac{Wx^2}{2T} + C_1x + C_2. \quad (8.16)$$

Тут C_1 та C_2 – константи інтегрування, що визначаються граничними умовами задачі. Для однорідного відкритого потоку зі сталою водопровідністю з заданими гідродинамічними напорами на межах $H = H_0$ при $x = 0$ та $H = H_L$ при $x = L$ отримуємо:

$$C_2 = H_0, \quad (8.17)$$

$$C_1 = \frac{H_L - H_0}{L} + \frac{W \cdot L}{2T}. \quad (8.18)$$

Тоді величина гідродинамічного напору в заданій точці перерізу потоку (на відстані x від межі) визначається за залежністю:

$$H_x = H_0 + \frac{H_L - H_0}{L} \cdot x + \frac{W \cdot x}{2T} \cdot (L - x). \quad (8.19)$$

12. Як визначається питома витрата потоку в заданому перерізі та на межах одномірного потоку зі сталою водопровідністю?

В заданому перерізі потоку x питома витрата визначається за такою залежністю:

$$q_x = -T \frac{dH}{dx} = T \frac{H_0 - H_L}{L} - W(0.5L - x). \quad (8.20)$$

Питомі витрати на межах потоку ($x = 0, x = L$) визначаються так:

$$q_0 = T \frac{H_0 - H_L}{L} - \frac{W \cdot L}{2}, \quad (8.21)$$

$$q_L = T \frac{H_0 - H_L}{L} + \frac{W \cdot L}{2}. \quad (8.22)$$

13. Як визначається гідродинамічний напір у заданій точці одномірного безнапірного однорідного потоку на горизонтальному водотриві?

З врахуванням правила переходу (8.13) можна отримати такий вираз:

$$h_x^2 = h_0^2 + \frac{h_L^2 - h_0^2}{L} \cdot x + \frac{W \cdot x}{K} \cdot (L - x). \quad (8.23)$$

14. Як визначається питома витрата потоку в заданому перерізі та на межах одномірного безнапірного однорідного потоку на горизонтальному водотриві?

В заданому перерізі потоку x питома витрата визначається, виходячи з (8.13), за такою залежністю:

$$q_x = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} - W(0.5L - x). \quad (8.24)$$

Відповідно питомі витрати на межах потоку ($x = 0, x = L$) визначаються так:

$$q_0 = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} - \frac{W \cdot L}{2}, \quad (8.25)$$

$$q_L = K \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} + \frac{W \cdot L}{2}. \quad (8.26)$$

15. В чому полягає суть методу фільтраційних опорів?

Якщо русло річки є гідродинамічно недосконалим (не перетинає всю потужність потоку), то поблизу русла має місце порушення передумови Дюпюї. Тому розрахункові залежності для одномірних потоків вимагають певного корегування за допомогою методу фільтраційних опорів. Суть методу фільтраційних опорів полягає в збільшенні шляху фільтрації на величину ΔL .

Для безнапірного однорідного потоку величина ΔL визначається за формулою:

$$\Delta L = 0.45 \cdot m, \quad (8.27)$$

де m – відстань від ложа річки до водотривого шару.

Для двошарового потоку, коли верхній шар є менш водопроникним, ніж нижній, величина ΔL визначається за формулою:

$$\Delta L = \sqrt{\frac{m_g \cdot K \cdot m}{K_g}}, \quad (8.28)$$

де K та m – коефіцієнт фільтрації та потужність нижнього шару, K_g та m_g – відповідно коефіцієнт фільтрації та потужність верхнього шару під руслом.

Величина ΔL вводиться як поправка у розрахунки шляхом заміни L на $L + \Delta L$.

Задача № 8.1

Визначити розподіл гідродинамічних напорів у міжрічковому масиві для відкритого безнапірного горизонтального потоку (розрахункова схема Дюпюї) в умовах інфільтраційного живлення по площі за такими даними:

№ варіанту	h_0 , м	h_L , м	L , м	K , м/діб	Річна сума ао, мм
1	20	18	2000	2	600
2	21	17	2000	5	600
3	19	15	2000	10	600
4	20	17	2000	1	600
5	22	18	2000	5	600
6	25	23	2000	8	600
7	21	18	2000	3	600

№ варіанту	h_0 , м	h_L , м	L, м	K, м/діб	Річна сума ао, мм
8	19	16	2000	6	600
9	18	15	2000	5	600
10	21	19	2000	2	600
11	20	18	2000	1	600
12	24	21	2000	5	600

* ао – атмосферні опади

Розрахунок провести з інтервалом 200 м.

Побудувати графік розподілу гідродинамічних напорів.

ТЕМА 9. ФІЛЬТРАЦІЯ В ЗОНІ ВПЛИВУ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Особливості гідродинамічної обстановки в зоні впливу гідротехнічних споруд. Поняття підпору підземних вод і способи визначення підпору в різних умовах. Визначення втрат води з водосховищ та на фільтрацію в береги і в районі греблі.

Головні питання та відповіді теми:

1. Які втрати води з гідротехнічної споруди можуть виникати при заповненні її водою?

Можуть мати місце тимчасові та постійні втрати води з гідротехнічної споруди.

2. Що таке "тимчасові втрати води" з гідротехнічної споруди?

Це та кількість води, що йде на насичення зони аерації в межах ложа споруди (водосховища чи каналу). Далі починається фільтрація в сторони від гідротехнічної споруди; у водосховищі при цьому деяка кількість води витрачається на насичення берегів. Ці втрати також є тимчасовими.

3. Що таке "підпір підземних вод"?

Підйом поверхні підземних вод, що має місце при заповненні водою водосховищ і каналів, називається підпором підземних вод. Підпір підземних вод розвивається поступово, тому розрізняють так званий неусталений та усталений підпір. Відповідно існують і методи оцінки цього явища для умов усталеної та неусталеної фільтрації.

4. В яких випадках мають місце "постійні втрати води" з гідротехнічної споруди?

Умови формування підпору підземних вод залежать від співвідношення відміток рівня підземних вод, проектною відмітки рівня в споруді, наявності та відстані до сусіднього дренажного утворення.

Якщо природна поверхня підземних вод розташована значно нижче проектного рівня води у споруді, то при заповненні такої споруди водою, після формування підпору підземних вод підземний вододіл не виникає, і фільтраційний потік направляється в сторону від водосховища до найближчої природної чи штучної дрени. В такому випадку виникають постійні втрати води зі споруди.

5. Які втрати води з водосховища можливі в районі греблі?

В районі греблі мають місце постійні втрати води, а саме втрати в обхід греблі, під фундаментом греблі та крізь тіло греблі.

6. Як виконується оцінка усталеного підпору підземних вод?

Така оцінка виконується на базі теорії усталеної одномірної фільтрації (див. Тому 8). Наприклад, рівняння кривої депресії для розрахункової схеми Дюпюї до формування підпору буде мати такий вигляд:

$$h_x^2 = h_0^2 + \frac{h_L^2 - h_0^2}{L} \cdot x + \frac{W \cdot x}{K} \cdot (L - x). \quad (9.1)$$

При зміні потужності потоку на межі $x = 0$ до величини y_0 , за умови, що довжина шляху фільтрації L не змінюється, після формування підпору рівняння отримує такий вигляд:

$$y_x^2 = y_0^2 + \frac{h_L^2 - y_0^2}{L} \cdot x + \frac{W \cdot x}{K} \cdot (L - x), \quad (9.2)$$

де y_x – потужність потоку на відстані x від його межі після формування підпору.

Віднімаючи рівняння (9.1) від (9.2), отримуємо рівняння для оцінки усталеного підпору підземних вод:

$$y_x^2 = h_x^2 + (y_0^2 - h_0^2) \cdot \frac{L - x}{L}. \quad (9.3)$$

7. Як виконується оцінка неусталеного підпору підземних вод?

Для оцінки неусталеного підпору зазвичай використовується методика, яка запропонована В.Шестаковим. За умови миттєвої зміни гідродинамічного напору на межі узагальнена розрахункова залежність для потоку зі сталою водопровідністю має вигляд:

$$\Delta H_{x,t} = \Delta H^0 \cdot F(x,t), \quad (9.4)$$

де $\Delta H_{x,t}$ – величина зміни гідродинамічного напору на відстані x від межі потоку на момент часу t ; ΔH^0 – величина зміни гідродинамічного напору на межі потоку; $F(x,t)$ - функція, вид і значення якої залежать від типу потоку та його характеристик (фільтраційних і ємнісних).

8. Як визначається функція $F(x,t)$ для умов потоку зі сталою водопровідністю?

Зазвичай функція $F(x,t)$ визначається за допомогою відповідних таблиць або графіків.

Якщо такий потік є напівобмеженим, $F(x,t) = \operatorname{erfc}(\lambda) = 1 - \operatorname{erf}(\lambda)$, де $\operatorname{erf}(\lambda)$ – еррор-функція, чи інтеграл імовірності Гауса.

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}}, \quad (9.5)$$

де x – відстань від межі потоку; a – коефіцієнт п'єзопровідності (рівнепровідності) пласта; t – час, на який визначається неусталений підпір.

Якщо потік є обмежено відкритим, за умови, що на межі $x = L$ гідродинамічний напір не змінюється, $F(x, t) = F_1 \left(\frac{x}{L}, \tau \right)$,

$$\tau = \frac{a \cdot t}{L^2}. \quad (9.6)$$

9. Для чого в аналітичних розрахунках неусталеного підпору використовується формула Асатура?

В реальних умовах на формування підпору підземних вод впливають періодичні (сезонні) коливання рівня води в поверхневих водотоках. Такий вплив можна оцінити за формулою Асатура:

$$L_e = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot h \cdot t_n}{\mu}}, \quad (9.7)$$

де L_e – відстань від урізу поверхневого водотока, на якій припиняється вплив періодичних коливань рівня у водотоці; K – коефіцієнт фільтрації; h – потужність водоносного горизонту; t_n – найбільший півперіод коливання рівня води у водотоці.

10. Як визначаються постійні фільтраційні втрати в береги водосховищ і каналів?

Постійні фільтраційні втрати визначаються як різниця витрат потоку підземних вод до та після формування підпору підземних вод.

11. Які особливості має процес фільтрації під тілом греблі, які негативні та небезпечні явища при цьому виникають?

При проходженні потоку підземних вод під тілом греблі виникає сила дії потоку на основу греблі (понур), яку можна розглядати як верхню межу напірного потоку. Ця сила направлена вгору. Внаслідок великого (порівняно з природним) градієнта гідродинамічного напору між б'єфами греблі швидкість фільтрації під її тілом сягає значних величин, що може викликати механічну суфозію в нижньому б'єфі. У зв'язку з цим можливі неприпустимі деформації та часткове руйнування основи греблі, що призводить до зменшення її стійкості в цілому.

12. Для чого під греблею влаштовується водонепроникна завіса?

Влаштування водонепроникної завіси (флютбету) приводить до збільшення шляху фільтрації та відповідно зменшення швидкості фільтрації. Отже, водонепроникна завіса запобігає руйнуванню греблі. Для захисту нижнього б'єфу від фільтраційних деформацій також будуються спеціальні пристрої – водобій та рисберма.

13. Як визначається витрата потоку підземних вод, що проходить під греблею?

За наявності водонепроникних завіс визначення витрати потоку під тілом греблі виконують за такою залежністю:

$$q = \frac{\Delta H}{\Phi_{\text{сум}}} = \frac{K \cdot \Delta H}{\bar{\Phi}_{\text{сум}}}, \quad (9.8)$$

де ΔH – перепад напорів між верхнім і нижнім б'єфами греблі; $\bar{\Phi}_{\text{сум}} = K \cdot \Phi_{\text{сум}}$ – сумарний безрозмірний опір; $\Phi_{\text{сум}}$ – сумарний фільтраційний опір підземного контуру споруди, дїб/кв. м; K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід.

14. Яка схема приймається для визначення фільтраційної витрати обхідної фільтрації?

При визначенні фільтраційної витрати обхідної фільтрації (фільтрації поза плечима греблі) приймається така схема:

- ◆ верхній і нижній б'єфи греблі умовно зводяться до однієї лінії;
- ◆ вважається, що потік підземних вод обходить греблю по еліпсу, розмір осей якого залежить від фільтраційних властивостей водовмісних порід, величини перепаду напорів між верхнім і нижнім б'єфами греблі, межі впливу водосховища. Визначення ведеться за емпіричними формулами (наприклад, залежність М.Верігіна).

15. Що таке "межа впливу" водосховища?

Це та відстань, де крива підпору підземних вод збігається з кривою природного розподілу гідродинамічних напорів, що мав місце до заповнення водою водосховища.

Додаткові запитання до теми:

1. Як визначається неусталений підпір підземних вод, якщо зміна гідродинамічного напору на межі потоку є ступінчастою?
2. Як визначається сумарний безрозмірний опір при розрахунку витрати потоку підземних вод, що проходить під греблею?

Задача № 9.1

1. Визначити величину усталеного підпору підземних вод в умовах одного відкритого обмеженого безнапірного однорідного горизонтального потоку на горизонтальному водотриві за наявності інфільтраційного живлення та незмінному урізі води на межі $x = L$. Розрахунок провести з інтервалом 200 м.

2. Чи будуть мати місце в такому випадку постійні втрати води в береги?

Варіант	h_0 , м	h_L , м	Δh_0 , м	L , м	K , м/діб	$\sum a_0$, мм/рік
1	12	14	2	1000	5	550
2	10	11	2	1000	2	625
3	13	14	2	1000	1	500
4	14	15	2	1000	2,5	650
5	11	12	2	1000	10	600
6	7	8	2	1000	1	475
7	6	8	2	1000	5	525
8	12	14	2	1000	4	450
9	13	14	2	1000	4	600
10	10	12	2	1000	5	550
11	12	14	2	1000	2	475
12	10	13	2	1000	10	500
13	11	13	2	1000	2,5	525
14	14	15	2	1000	1	575
15	11	12	2	1000	2	550
16	7	8	2	1000	10	600

Тут h_0 – потужність потоку підземних вод на межі $x=0$; h_L – потужність потоку підземних вод на межі $x=L$; Δh_0 – величина підйому рівня на межі $x=0$;

L – відстань між сусідніми водотоками; K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід; $\sum ao$ – річна сума атмосферних опадів.

Задача № 9.2

Визначити величину неусталеного підпору підземних вод на період 15, 30, 60, 90 діб із кроком 50 м в умовах обмеженого горизонтального відкритого потоку за відсутності інфільтраційного живлення та миттєвого підйому рівня на межі потоку за такими даними:

$H_0 = 110$ м, $H_n = 115$ м, $H_e = 100$ м, $H_L = 120$ м, $L = 500$ м, $K = 5$ м/діб, $\mu = 0,15$, де:

H_0 – абсолютна відмітка напору на межі $x=0$;

H_n – абсолютна відмітка напору на межі $x=0$ після встановлення підпору;

H_e – абсолютна відмітка водотривкого шару;

H_L – абсолютна відмітка напору на межі $x=L$;

L – відстань між водотоками;

K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід;

μ – коефіцієнт гравітаційної ємності гірської породи.

Задача № 9.3

Визначити фільтраційну витрату потоку підземних вод в обхід греблі (точно та приблизно) в умовах горизонтального безнапірного однорідного потоку на горизонтальному водотриві за такими даними:

Абсолютна відмітка води у створі водосховища – 112,7 м, у річці – 109,6 м, у спостережній свердловині на відстані 500 м від створу греблі – 110,6 м, абсолютна відмітка покрівлі водотривкого шару – 98,7 м, довжина обтічного контуру примикання греблі – 95 м, коефіцієнт фільтрації водовмісних порід – 1,7 м/діб.

ТЕМА 10. ФІЛЬТРАЦІЯ В ЗОНІ ВПЛИВУ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ВОДОЗАБОРІВ

Поняття горизонтального водозабору. Процеси фільтрації в зоні впливу горизонтальних водозаборів (дренажів). Досконалі й недосконалі горизонтальні водозабори. Типи дренажів, гідродинамічні розрахунки горизонтальних водозаборів.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що називають горизонтальними водозаборами?

Горизонтальними водозаборами називають такі штучні споруди, які призначені для збору (каптажу) підземних вод і мають довжину по горизонталі, що в багато разів перевищує їх інші розміри.

2. Які штучні споруди належать до горизонтальних водозаборів?

Це відкриті (осушувальні) канали, канави, траншеї, галереї, підземні штреки, трубчасті горизонтальні дрени.

3. Які горизонтальні водозабори називають досконалими?

Досконалими називають такі водозабори, стінки яких розкривають всю потужність водоносного горизонту, наприклад, водотривке ложе та депресійну поверхню безнапірного водоносного горизонту (остання утворюється під дією водозабору). Вони приймають воду лише через стінки.

4. Які горизонтальні водозабори називають недосконалими?

Недосконалими називають такі водозабори, які не відповідають вимогам, що ставлять до досконалих водозаборів.

5. Як класифікуються горизонтальні водозабори за умовами розкриття водоносних горизонтів?

Існують такі водозабори:

- ◆ досконалі траншеї в безнапірних водоносних горизонтах;
- ◆ досконалі трубчасті дрени;
- ◆ досконалі траншеї в напірних водоносних горизонтах;
- ◆ недосконалі траншеї в безнапірних водоносних горизонтах;
- ◆ недосконалі трубчасті дрени;
- ◆ недосконалі траншеї в напірних водоносних горизонтах.

6. Що таке дебіт водозабору?

Кількість води, що відбирається з горизонтального водозабору за одиницю часу, називається дебітом водозабору.

7. Що таке динамічний рівень води в горизонтальному водозаборі?

Рівень води в водозаборі, що виникає під дією відбору води з нього, називається динамічним рівнем. Динамічний рівень розташований нижче природної поверхні підземних вод.

8. Що таке депресійна поверхня?

Поверхня рівня підземних вод у межах зони, яка знижена під дією водозабору (порівняно з природним рівнем поверхні підземних вод), називається депресійною поверхнею. В межах цієї зони відбувається фільтрація в напрямі до водозабору.

9. Як відбувається процес розвитку депресійної поверхні в часі?

Зразу після початку дії горизонтального водозабору з обох сторін від нього розвивається штучний неусталений потік, відповідно розміри зони знижених гідродинамічних напорів весь час збільшуються. Дебіт водозабору в цей час формується за рахунок бокового притоку та живлення водоносного горизонту по площі. З часом процес уповільнюється, і настає стан гідродинамічної рівноваги, а потік, що прямує до водозабору, можна вважати усталеним.

10. Що таке усталена межа впливу горизонтального водозабору?

Відповідно до процесу розвитку депресійної поверхні збільшується і межа впливу горизонтального водозабору. Ця межа стабілізується при досягненні усталеного режиму фільтрації. В такому випадку вона є усталеною межею впливу горизонтального водозабору (відстань від водозабору до перерізу, де депресійна поверхня збігається з природною).

11. Які залежності є придатними для розрахунку горизонтальних досконалих водозаборів в умовах усталеної фільтрації?

У зв'язку з тим, що дрена приймається нескінченної довжини, потік підземних вод, що розвантажується у горизонтальний водозбір, являє собою стрічкоподібний відкритий потік, однією з меж якого є сама дрена, а іншою – контур живлення або розвантаження потоку (наприклад, річка). Тому для виконання розрахунків горизонтальних досконалих водозаборів (визначенню дебіту та положення депресійної поверхні) в умовах усталеної фільтрації можна використовувати ті самі розрахункові залежності, що і для одномірних природних потоків.

12. За якими залежностями розраховується усталений потік до дрени, якщо водоносний пласт має постійну водопровідність за умови відсутності інфільтраційного живлення?

Питома витрата такого потоку визначається за залежністю:

$$q_d = T \cdot \frac{H_L - H_d}{L_y}, \quad (10.1)$$

де T – коефіцієнт водопровідності потоку, кв. м/дїб; H_L, H_d – гідродинамічний напір на межі потоку ($x = L$) та у дрени, м; L_y – усталена межа впливу горизонтального водозабору, м.

Гідродинамічний напір у точці x визначається за такою залежністю:

$$H_x = H_L - \frac{H_L - H_d}{L_y} \cdot x. \quad (10.2)$$

13. За якими залежностями розраховується усталений потік до дрени, якщо водоносний пласт є безнапірним на горизонтальному водотриві?

Питома витрата такого потоку визначається за залежністю:

$$q_d = K \cdot \frac{h_L^2 - h_d^2}{2 \cdot L_y}, \quad (10.3)$$

де K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід, м/дїб; h_L, h_d – потужність водонасиченої товщі на межі потоку ($x = L$) та в дрени, м; L_y – усталена межа впливу горизонтального водозабору, м.

Потужність потоку в точці x визначається за такою залежністю:

$$h_x = \sqrt{h_d^2 + \frac{h_L^2 - h_d^2}{L_y} \cdot x}. \quad (10.4)$$

14. Що таке ділянка витікання води (виточування) і чому вона виникає?

Внаслідок значного викривлення лінії току поблизу горизонтальної відкритої дрени в безнапірному потоці на стінках дрени виникає так звана ділянка витікання. Тобто, потік розвантажується в дрена дещо вище, ніж динамічний рівень води в цьому горизонтальному водозборі (на величину ділянки витікання Δh). Величина Δh має бути врахована при визначенні положення депресійної поверхні. Δh визначається за залежністю:

$$\Delta h = \frac{q}{K} \cdot (n + 0.5), \text{ якщо } n > 1, \quad (10.5)$$

$$\Delta h = 0.75 \cdot \frac{q}{K} \cdot (n + 1), \text{ якщо } 0 < n \leq 1, \quad (10.6)$$

де q - питома витрата; n - відношення основи дрени до її висоти.

15. Як визначається величина впливу дрени у гідродинамічних розрахунках?

Якщо дрена діє в обмеженому потоці, то величина її впливу фіксується як відстань від дрени до межі потоку.

В необмеженому потоці величина межі впливу визначається умовами живлення підземних вод. За відсутності бічного притоку та наявності інфільтраційного живлення по площі межа впливу дрени визначається за такою залежністю:

$$L_y = \sqrt{\frac{K}{2 \cdot W} \cdot (h_L^2 - h_d^2)}. \quad (10.7)$$

При живленні безнапірного потоку за рахунок перетікання через слабopроникний пласт із нижчезалягаючого напірного водоносного горизонту L_y визначається за залежністю:

$$L_y = \sqrt{\frac{m_{PH} Km}{K_{PH}}}. \quad (10.8)$$

При живленні напірного потоку за рахунок перетікання через слабopроникні пласти із залягаючих вище та нижче напірних потоків L_y визначається так:

$$L_y = \sqrt{Km \cdot \left(\frac{m_{PB}}{K_{PB}} + \frac{m_{PH}}{K_{PH}} \right)}. \quad (10.9)$$

В залежностях (10.8), (10.9) величини $\frac{m_{PB}}{K_{PB}}$ та $\frac{m_{PH}}{K_{PH}}$ є відношенням потужності до коефіцієнту фільтрації відповідно верхнього та нижнього слабо проникних пластів, а величина Km – це коефіцієнт водопровідності напірного потоку, що розглядається.

16. Як визначається час настання усталеного режиму фільтрації до горизонтального водозабору в безнапірному потоці за умови, що гідродинамічний напір на зовнішній межі потоку є сталим?

Час настання усталеного режиму фільтрації t_y визначається за залежністю:

$$t_y = 0.8 \cdot \frac{L_x^2}{a_p}, \quad (10.10)$$

де L_x – відстань до найближчої межі потоку; a_p – коефіцієнт рівнепровідності пласту.

17. Що таке неусталена межа впливу дрени?

Це відстань (L_d) від дрени до перерізу, де депресійна поверхня збігається з природною поверхнею рівня підземних вод, що має місце в ході розвитку процесу неусталеної фільтрації. Для визначення L_d розроблені формули І. Жернова та І. Павловця.

18. Які причини викликають необхідність застосування для розрахунку недосконалих горизонтальних водозаборів наближених математичних методів і особливих прийомів схематизації?

Це пов'язано з тим, що недосконала горизонтальна дрена повністю не розділяє природний підземний потік на дві частини, що приводить до виникнення в районі дрени складного потоку. Внаслідок цього виникає додатковий опір при вході води в дрена, що приводить до зменшення дебіту недосконалої дрени порівняно з дебітом досконалої дрени в таких самих умовах.

19. Які методи пропонуються для гідродинамічних розрахунків неусталених досконалих горизонтальних дрен?

Для таких розрахунків пропонуються методи:

- ◆ метод використання поправочного коефіцієнту недосконалості (метод С. Аверьянова);
- ◆ метод розподілу фільтраційного потоку з наступним використанням методу конформних відображень (метод Р. Чугаєва);
- ◆ метод заміни недосконалої дрени на досконалу (метод В. Шестакова).

Найбільш поширеним у практиці гідродинамічних розрахунків є метод В. Шестакова.

20. У чому суть методу С.Аверьянова для розрахунку недосконалих горизонтальних водозаборів?

Метод заснований на використанні поправочного коефіцієнту на недосконалість α , що вводиться в розрахункові залежності для досконалих дрен. Коефіцієнт α визначається за емпіричними формулами для пластів зі сталою водопровідністю. Існують формули для визначення α в умовах симетричного та асиметричного потоків.

21. У чому суть методу Р.Чугаєва для розрахунку недосконалих горизонтальних водозаборів?

Згідно з цим методом однорідний горизонтальний симетричний потік розділяється на дві зони:

- ◆ верхня зона, яка обмежена депресійною поверхнею та горизонтальною лінією, що проведена через дно дрени;
- ◆ нижня зона, яка обмежена горизонтальною лінією, що проведена через дно дрени, та горизонтальним водотривом.

При цьому верхня зона розглядається як безнапірна, а нижня як напірна. Притік до дрени розглядається окремо з боків (як для досконалої дрени) для верхньої зони та через дно для нижньої зони. На основі методу Р. Чугаєва А. Романов отримав розрахункові формули у вигляді, більш придатному щодо практичного використання.

22. У чому суть методу В.Шестакова для розрахунку недосконалих горизонтальних водозаборів?

За цим методом вводиться поправка на недосконалість дрени шляхом штучного збільшення довжини потоку на величину, яка є еквівалентною гідравлічному опору. Гідравлічний опір виникає внаслідок значних деформацій ліній току поблизу недосконалої дрени.

23. Для яких умов розроблений згаданий метод В. Шестакова?

Метод розроблений для умов однорідного пласта та двохшарового пласта з дреною, розміщеною у верхньому слабопроникному шарі.

24. Чому при гідродинамічних розрахунках необхідно враховувати скінчену довжину дрени?

Це необхідно для більш точного визначення притоку до горизонтальної дрени, а саме для врахування тієї кількості води, що поступає у дренаж з її торців. Біля торців горизонтальної дрени виникає потік, подібний до радіального. Скінчена довжина враховується шляхом застосування так званого коефіцієнту короткості дрени.

25. Як визначається коефіцієнт короткості дрени?

Коефіцієнт короткості дрени ϕ визначається за допомогою відповідної таблиці і залежить від відношення довжини горизонтальної дрени b до відстані до межі потоку L (або усталеної межі впливу дрени L_y).

26. Як визначається загальний дебіт горизонтальної дрени з урахуванням скінченності її довжини?

Дебіт Q визначається за залежністю:

$$Q = \frac{q \cdot b}{\phi}, \quad (10.11)$$

де q – питомий дебіт дрени, кв. м/діб; b – довжина дрени, м; ϕ – коефіцієнт короткості дрени.

27. Що таке "систематичний горизонтальний дренаж"?

Це система, що складається з багатьох взаємодіючих горизонтальних дренажів, які розміщені по площі відповідно до гідрогеологічних умов, рельєфу території та її забудови.

28. В яких випадках є доцільним використання систематичного горизонтального дренажу?

Використання систематичного горизонтального дренажу є доцільним в місцях, де на великих площах необхідно підтримувати рівень підземних вод на певній заданій глибині за наявності суттєвого інфільтраційного живлення підземних вод. Наприклад, такі умови виникають на зрошувальних територіях.

29. Як схематизуються умови для гідродинамічних розрахунків систематичних горизонтальних дренажів?

Для гідродинамічних розрахунків приймається така схематизація:

- ◆ дрени (головним чином недосконалі) нескінченної довжини розташовані паралельно та на однаковій відстані одна від одної;
- ◆ дрени однаково заглиблені у водоносний горизонт, мають однакові геометричні розміри та діють при рівних зниженнях рівня підземних вод;

◆ витрати дрен складаються з води, яка звільняється при зниженні поверхні підземних вод, та з води за рахунок живлення по площі.

Така схематизація дозволяє замість системи взаємодіючих дрен розглядати дію одиночної дрени в обмеженому фрагменті. Бічними межами такого фрагменту є перерізи, які проведені посередині між дренами та через вісь дрени.

Задача № 10.1

Визначити дебіт горизонтальної дрени в умовах усталеної фільтрації в безнапірному пласті на горизонтальному водотриві та положення депресійної поверхні з кроком 50 м із врахуванням ділянки витікання дрени за такими даними:

Варіант	Параметри дрени							
	H_{np} , м	H_o , м	H_e , м	довжина, м	глибина, м	ширина, м	W , м/діб	K , м/діб
1	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,35
2	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00021	0,3
3	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00023	0,5
4	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,44
5	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,35
6	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,15
7	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,5
8	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,8
9	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00022	0,4
10	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,25
11	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00025	0,15
12	60	58,5	58	500	2	0,5	0,00024	0,25

Тут H_{np} – абсолютна відмітка напору до початку роботи горизонтального дренажу; H_o – абсолютна відмітка напору після роботи горизонтального дренажу; H_e – абсолютна відмітка водотривкого шару; W – величина інфільтраційного живлення по площі; K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід.

Задача № 10.2

Визначити загальний дебіт досконалої горизонтальної дрени з врахуванням скінченної довжини на період 15, 30, 60, 90 діб в умовах горизонтального обмеженого безнапірного пласта за таким даними: абсолютна відмітка рівня води в дрени 110 м, відстань від дрени до межі потоку 200 м, абсолютна відмітка рівня води на межі потоку 112 м, абсолютна відмітка водотриву 98 м, довжина дрени 500 м, коефіцієнт фільтрації пласту 5 м/діб, коефіцієнт гравітаційної водовіддачі 0,2.

Для розрахунків використати формули І. Жернова та І. Павловця. Порівняти отримані результати.

Задача № 10.3

Визначити питому витрату закритої недосконалої трубчастої горизонтальної дрени, що закладена в асиметричному горизонтальному відкритому потоці за такими даними: абсолютна відмітка дна дрени – 101 м, діаметр дрени 0,5 м, відстань від дрени до лівої межі потоку 100 м, абсолютна відмітка рівня води на лівій межі

поток 105 м, відстань від дрени до правої межі потоку 200 м, абсолютна відмітка рівня води на лівій межі потоку 103 м, абсолютна відмітка водотриву 100 м:

$$H_1 = 105 \text{ м}, H_2 = 103 \text{ м}, d = 0,5 \text{ м}, L_1 = 100 \text{ м}, L_2 = 200 \text{ м},$$

$$H_o = 101 \text{ м}, H_e = 100 \text{ м}, K = 1 \text{ м/дїб}.$$

В розрахунки ввести поправку на недосконалість.

ТЕМА 11. ФІЛЬТРАЦІЯ В ЗОНІ ВПЛИВУ ОДИНОЧНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВОДОЗАБОРІВ (СВЕРДЛОВИН)

Поняття вертикального водозабору. Процеси фільтрації в зоні впливу одиночних вертикальних водозаборів (свердловин). Досконалі та недосконалі вертикальні водозабори. Гідродинамічні розрахунки одиночних вертикальних водозаборів.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що називають вертикальними водозаборами?

Вертикальними водозаборами називають штучні споруди, що призначені для збору води. Вони мають розміри в плані набагато разів менші розмірів водоносних пластів і їх потужності. До вертикальних водозаборів відносять трубчасті бурові колодязі (свердловини), шахтні колодязі, шурфи, іноді котловани.

2. Як класифікуються вертикальні водозабори за умовами розкриття водоносних пластів?

Вертикальні водозабори поділяються на два типи: досконалі та недосконалі. Розрізняють два види недосконалості вертикальних водозаборів:

- ◆ за характером розкриття водоносного горизонту;
- ◆ за ступенем розкриття водоносного горизонту.

3. Що таке недосконалість за характером розкриття водоносного горизонту?

Недосконалість за характером розкриття водоносного горизонту визначається особливостями водоприймальної частини водозаборів – наявністю фільтрів, зміною водопроникності породи в зоні водоприймальної частини, порушенням тут лінійного закону фільтрації. По суті всі існуючі типи вертикальних водозаборів є недосконалими у цьому відношенні.

4. Які вертикальні водозабори є досконалими за ступенем розкриття водоносного горизонту?

Досконалими за ступенем розкриття водоносного горизонту називають такі вертикальні водозабори, стінки яких в умовах безнапірного пласта перетинають депресійну поверхню водоносного горизонту, що утворилась під дією водозабору, та розкривають водотривке ложе. В напірних пластах досконалий водозабір має розкривати всю потужність водоносного горизонту. Досконалий водозабір приймає воду лише через стінки.

5. Які вертикальні водозабори є недосконалими за ступенем розкриття?

Недосконалими за ступенем розкриття водоносного горизонту називаються такі вертикальні водозабори, які не задовольняють хоча б одній із наведених вище умов.

6. Що таке дебіт свердловини (вертикального водозабору)?

Дебіт чи витрата свердловини – це та кількість води, яку можна добути із свердловини за певний період часу шляхом відкачування (або самовиливу).

7. Що таке статичний і динамічний рівні води у свердловині?

Статичним називається рівень води (гідродинамічний напір), що встановився у свердловині після розкриття свердловиною водоносного горизонту. Динамічним називається рівень, що утворився внаслідок відбору води із свердловини (відкачування).

8. Що таке радіус впливу свердловини?

Це радіус зони знижених гідродинамічних напорів, що виникає навколо свердловини внаслідок відбору з неї води (відстань від водозабору до перерізу, де гідродинамічний напір збігається з природним). Для усталеного потоку він позначається як R_y .

9. Що таке депресійна та п'єзометрична воронки?

В безнапірних пластах зона знижених гідродинамічних напорів називається депресійною воронкою, а в напірних – п'єзометричною воронкою. Слід відмітити, що п'єзометрична воронка є уявною, на відміну від депресійної воронки.

10. Який вигляд має рівняння усталеної фільтрації до одиночної досконалої свердловини, яка діє в ізольованому напірному пласті?

В ізольованому напірному пласті потік поблизу одиночної свердловини має плоскорадіальний характер. Вперше такий потік був розглянутий французьким гідравліком Ж. Дюпюї. В такому потоці лінії току являють собою радіуси, а лінії рівних гідродинамічних напорів будуть проходити по концентричних колах з центром на осі свердловини. В цьому випадку ширина потоку з радіусом r становитиме $b = 2\pi r$, а градієнт гідродинамічного напору $I = -\frac{dH}{dr}$ матиме той же знак (від'ємний), що і витрата при відкачуванні. Відповідно:

$$Q = 2\pi r T \frac{dH}{dr}, \quad (11.1)$$

$$dH = \frac{Q}{2\pi T} \frac{dr}{r}. \quad (11.2)$$

11. Як виконується розв'язання рівняння усталеної фільтрації до одиночної досконалої свердловини, яка діє в ізольованому напірному пласті?

Розв'язок отримують шляхом інтегрування рівняння (11.2) в межах від граничного перерізу $r = r_c$, де $H = H_c$ до поточного перерізу з радіусом r та гідродинамічним напором H :

$$H - H_c = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (11.3)$$

де H_c – гідродинамічний напір у свердловині, м; r_c – радіус свердловини, м; T – коефіцієнт водопровідності пласта, кв. м/діб.

12. Як виконується перехід від розрахунку гідродинамічних напорів до розрахунку зниження гідродинамічного напору в ізольованому пласті при усталеній фільтрації під дією одиночної досконалої свердловини?

Зниження гідродинамічного напору в точках з гідродинамічним напором H (зниження в певній точці S) та H_c (зниження у свердловині S_c) можна записати у вигляді:

$$S = H_0 - H, \quad (11.4)$$

$$S_c = H_0 - H_c, \quad (11.5)$$

де H_0 – гідродинамічний напір у природних умовах (до відкачування зі свердловини).

Тоді, виходячи з (11.3), (11.4), (11.5):

$$S_c - S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r}{r_c}. \quad (11.6)$$

Враховуючи, що зниження на межі радіуса впливу свердловини R_y дорівнює 0, вираз (11.6) можна записати у такому вигляді:

$$S_c = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R_y + r_c}{r_c}. \quad (11.7)$$

Формула (11.7) відома як формула Дюпюї для свердловини в умовах напірного ізольованого пласта при усталеному режимі фільтрації. Враховуючи правила переходу (див. Тему 8), подібні рівняння можна отримати для основних розрахункових типів потоків.

13. Який вигляд має формула Дюпюї для свердловини в умовах безнапірного потоку на горизонтальному водотриві при усталеному режимі фільтрації?

З врахуванням правила переходу (8.13) формула має вигляд:

$$h_0^2 - h_c^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R_y + r_c}{r_c}, \quad (11.8)$$

де h_0 – потужність потоку в природних умовах; h_c – потужність потоку у свердловині при відкачуванні.

14. Який вигляд має формула Дюпюї для свердловини в умовах горизонтального однорідно-шаруватого потоку при усталеному режимі фільтрації?

З врахуванням правила переходу (8.14) формула має вигляд:

$$G_0 - G_c = \frac{Q}{2\pi} \ln \frac{R_y - r_c}{r_c}, \quad (11.9)$$

де G_0 – функція Грінського, що відповідає потужності потоку у природних умовах; G_c – функція Грінського, що відповідає потужності потоку в свердловині при відкачуванні.

15. Які фактори впливають на формування п'єзометричної поверхні при неусталеній фільтрації до свердловини в напірному водоносному пласті?

На формування п'єзометричної поверхні впливають такі фактори: пружні властивості води та породи, потужність водоносного пласта та його водопроникні властивості, режим відкачування тощо.

16. Назвіть основні режими відкачування води зі свердловин, для яких виконуються гідродинамічні розрахунки?

Основні режими відкачування води зі свердловини:

- ◆ режим заданого дебіту свердловини ($Q = f(t)$, $Q = const$);
- ◆ режим заданого гідродинамічного напору (заданого зниження) у свердловині ($H_c = f(t)$, $H_c = const$).

17. Який вигляд має розв'язок рівняння неусталеної фільтрації до досконалої свердловини в ізольованому напірному пласті?

Процес формування п'єзометричної поверхні внаслідок дії свердловини в умовах неусталеної фільтрації в ізольованому напірному пласті описується таким диференціальним рівнянням:

$$a_n \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (11.10)$$

Розв'язок рівняння (11.10) в зниженнях напору за умови необмеженого ізольованого напірного потоку зі сталою водопровідністю при постійному дебіті відкачування зі свердловини був вперше отриманий Ч.Тейсом. Розв'язок отримав назву формули Тейса і має такий вигляд:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u), \quad (11.11)$$

$$u = \frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t}, \quad (11.12)$$

де S – зниження гідродинамічного напору в точці на відстані r від центру свердловини на момент часу t , м; $W(u)$ – так звана функція свердловини.

18. Що являє собою функція свердловини $W(u)$ (well – функція за Ч.Тейсом)?

Функція свердловини $W(u)$ пов'язана з відомою функцією – інтегральним експоненціалом E_i :

$$W(u) = -E_i(u), \quad (11.13)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx = -0.577 - \ln u + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} - \frac{u^4}{96} + \dots \quad (11.14)$$

Значення функції свердловини $W(u)$ можна отримати за допомогою спеціальних таблиць або графіків.

Якщо аргумент u функції свердловини є меншим, ніж 0,1 (за великих значень a_n і t), числовий ряд у (11.14) можна апроксимувати двома першими

членами з відносною похибкою до 5 %. В такому разі функцію свердловини можна представити у вигляді логарифмічної залежності:

$$W(u) = -0.577 - \ln(u) = \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot t}{r^2}. \quad (11.15)$$

За таких умов формула Тейса має такий вигляд:

$$S = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot t}{r^2} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{1.5 \cdot \sqrt{a_n \cdot t}}{r}. \quad (11.16)$$

19. Що означає поняття неусталеного радіуса впливу свердловини?

Порівнявши формулу Дююї (11.7) для умов усталеної фільтрації та формулу Тейса (11.16) для умов неусталеної фільтрації, можна зробити висновок, що ці рівняння є однотипними за формою. Тому вираз $1.5 \cdot \sqrt{a_n \cdot t}$ у формулі Тейса відповідає неусталеному радіусу впливу свердловини. Таким чином, величина неусталеного радіуса впливу свердловини R_i визначається за залежністю:

$$R_i = 1.5 \cdot \sqrt{a_n \cdot t}. \quad (11.17)$$

20. Що таке квазістаціонарний режим фільтрації?

Це такий режим фільтрації до свердловини, за якого величина $u < 0.1$. В такому випадку п'єзометрична воронка при відкачуванні опускається паралельно самій собі, а розподіл гідродинамічних напорів у просторі в кожний момент часу відповідає закономірностям усталеного режиму фільтрації.

21. Чому попередні вирази, які отримані для необмеженого ізольованого напірного пласта при неусталеній фільтрації, не можна застосовувати для неоднорідно-шаруватих пластів?

Такі пласти по суті не є ізольованими, тому що має місце перетікання із сусідніх водоносних пластів.

22. В чому полягають принципи розрахунків одиночних свердловин при неусталеній фільтрації в неоднорідно-шаруватих напірних пластах?

Задача для таких пластів вперше була розв'язана Ч. Джекобом і М. Хантушем. Аналогічно розв'язку рівняння для ізольованого напірного пласта запропонована функція свердловини для пластів із перетіканням $W_n \left(u, \frac{r}{B} \right)$:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W_n \left(u, \frac{r}{B} \right), \quad (11.18)$$

де B – узагальнений фактор перетікання.

$$B = \sqrt{\frac{m_{PB}T}{K_{PB}} + \frac{m_{PH}T}{K_{PH}}}, \quad (11.19)$$

де K_{PB} – коефіцієнт фільтрації верхнього роздільного шару; K_{PH} – коефіцієнт фільтрації нижнього роздільного шару; m_{PB} – потужність верхнього роздільного шару; m_{PH} – потужність нижнього роздільного шару; T – коефіцієнт водовідності основного напірного пласта.

Значення функції свердловини для пластів із перетіканням $W_n\left(u, \frac{r}{B}\right)$ мож-
на отримати за допомогою спеціальних таблиць або графіків.

23. В чому полягають принципи розрахунків одиночних свердловин при змінному в часі дебіті?

За умови постійної вопопровідності пласта використовується метод суперпозиції (накладання течії). Якщо, наприклад, в умовах квазіусталеного режиму фільтрації відкачування складається з двох ступенів дебіту Q_1 та Q_2 , причому перша ступінь дебіту мала місце протягом часу t_1 , то відповідне рівняння має вигляд:

$$S = \frac{Q_1}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{1.5 \cdot \sqrt{a_n \cdot t_1}}{r} + \frac{\Delta Q_2}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{1.5 \cdot \sqrt{a_n \cdot (t - t_1)}}{r}, \quad (11.20)$$

де $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_1$.

24. В чому полягає принцип врахування прямолінійних у плані меж пласта при розрахунках одиночних свердловин?

В таких випадках використовується метод дзеркальних відображень, що полягає у "побудові" за межею фіктивної свердловини. Фіктивна свердловина будується на лінії перпендикуляру, який проведений до межі потоку від реальної свердловини, на такій самій відстані від межі потоку, як і реальна свердловина. Далі застосовується метод суперпозиції. Наприклад, загальне зниження гідродинамічного напору в певній точці напівобмеженого пласта з непроникною межею в умовах квазістаціонарного режиму фільтрації розглядається як результат дії спареної системи свердловин (реальної та фіктивної). Загальне зниження в такому випадку становить:

$$S = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot t}{r \cdot \rho}, \quad (11.21)$$

де r – відстань від розрахункової точки до реальної свердловини; ρ – відстань від розрахункової точки до фіктивної свердловини.

25. Які фактори впливають на процес формування депресійної воронки в безнапірних пластах?

Процес формування депресійної воронки в безнапірних пластах ускладнюється дією трьох факторів, які приводять до аномального, порівняно з напірними пластами, процесу її формування.

1. Порушення передумови Дюпюі. Причина порушення полягає в тому, що гравітаційна водовіддача, на відміну від пружної, має місце лише на межі вільної поверхні, а не розповсюджується на весь пласт. Туму виникає вертикальна складова фільтрації.

2. Гравітаційна водовіддача зростає в часі поступово, що обумовлено розтягуванням капілярної зони при зниженні вільної поверхні потоку.

3. Зміна потужності потоку (відповідно коефіцієнтам водопровідності та рівнепровідності) при зменшенні гідродинамічного напору.

26. Які періоди формування депресійної воронки спостерігаються в безнапірних пластах при неусталеному режимі фільтрації?

В процесі формування депресійної воронки в безнапірних пластах спостерігаються такі періоди:

- ◆ пружно-гравітаційного режиму фільтрації;
- ◆ несправжнього стаціонарного режиму фільтрації;
- ◆ гравітаційного режиму фільтрації.

В період пружно-гравітаційного режиму фільтрації спочатку має місце пров'яз пружної водовіддачі, потім потік до свердловини формується за рахунок гравітаційної водовіддачі.

В період несправжнього стаціонарного режиму фільтрації спостерігається процес стабілізації напору, що обумовлено станом гідродинамічної рівноваги, коли дебіт свердловини поповнюється за рахунок збільшення гравітаційної водовіддачі.

Період гравітаційного режиму фільтрації настає тоді, коли гравітаційна водовіддача досягла максимальної величини.

Додаткові запитання до теми:

1. Яка гранична умова має місце у свердловині при відкачуванні з постійним дебітом?
2. Яка гранична умова має місце при відкачуванні з постійним гідродинамічним напором у свердловині?
3. Як буде змінюватись динамічний рівень води в свердловині при відкачуванні з постійним дебітом?
4. Як буде змінюватись дебіт водозабору при відкачуванні з постійним гідродинамічним напором у свердловині?
5. Чим обумовлено зростання гравітаційної водовіддачі в часі при відкачуванні зі свердловини в безнапірному пласті?
6. Як проявляються різноманітні режими відкачування зі свердловини в безнапірних водоносних горизонтах на графіках зниження гідродинамічних напорів?

Задача № 11.1

Визначити дебіт досконалої свердловини, закладеної у водоносному горизонті, що відповідає розрахунковій схемі Дюпюї, за такими даними:

Варіант	H_c , м	H_g , м	K , м/діб	r_c , м	R_y , м	S_c , м
1	13,4	3,1	3	0,108	300	2
2	165	150	5	0,108	200	2,6
3	160	150	10	0,108	200	2
4	120	115	2,5	0,108	300	2
5	100	80	10	0,108	300	2
6	100	80	10	0,108	500	2
7	100	95	10	0,108	500	3,5
8	100	95	5	0,108	100	2,5
9	100	90	1	0,108	200	2
10	55	24	2,5	0,108	300	2
11	60	50	5	0,108	200	2
12	13,4	5,5	2	0,108	200	2

Тут: H_c – відмітка напору у свердловині; H_g – відмітка напору водотривкого шару; K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід; r_c – радіус свердловини; R_y – усталений радіус впливу свердловини; S_c – зниження напору в свердловині.

Задача № 11.2

Визначити коефіцієнт фільтрації напірного ізольованого напівобмеженого водоносного пласта з постійним напором на межі в умовах усталеного режиму фільтрації за такими даними:

Дебіт недосконалої свердловини 540 куб. м/діб, зниження у свердловині – 14 м, потужність пласта 25 м, відстань від свердловини до межі – 100 м, глибина свердловини – 70 м, глибина встановлення фільтра – 60 м, довжина фільтра – 2 м, радіус труби – 0,108 м.

При визначенні врахувати недосконалість свердловини за ступенем розкриття, користуючись графіками Ф. Бочевера. Зробити висновок про водопроникність породи та її орієнтовний гранулометричний склад.

Задача № 11.3

Визначити величину зниження рівня підземних вод в результаті роботи доконалої свердловини в безнапірному потоці при наявності інфільтраційного живлення на відстані 10, 50, 100, 150 м від свердловини за такими даними:

Варіант	H_{CT} , м	H_B , м	Q , куб. м/добу	K , м/добу	W , м/діб	r_c , м
1	70	50	120	20	0,0003	0,108
2	70	50	100	20	0,00025	0,108
3	70	50	110	20	0,00026	0,108
4	70	50	130	20	0,0002	0,108
5	70	50	150	20	0,00022	0,108
6	70	50	120	20	0,00028	0,108
7	70	50	110	20	0,00027	0,108
8	70	50	130	20	0,00024	0,108
9	70	50	115	20	0,00033	0,108
10	70	50	125	20	0,00026	0,108
11	70	50	135	20	0,00031	0,108
12	70	50	125	20	0,00035	0,108

Тут: H_{CT} – абсолютна відмітка статичного рівня води у свердловині; H_B – абсолютна відмітка водотривкого шару; Q – дебіт свердловини; K – коефіцієнт фільтрації; W – інфільтраційне живлення по площі; r_c – радіус свердловини.

Задача № 11.4

Свердловина розкриває напірний необмежений пласт з відміткою напору 127,5 м. Коефіцієнт фільтрації пласту – 5,7 м/діб. Потужність пласту 10,3 м. Коефіцієнт пружної водовіддачі пласту 0,002. Дебіт свердловини 130 куб. м/діб. Радіус свердловини 0,2 м.

1. Який буде гідродинамічний напір у свердловині через 100 та 200 діб після початку відкачування?
2. Якою буде величина неусталеного радіусу впливу свердловини через 100 та 200 діб?
3. Який буде гідродинамічний напір на відстані 20, 30, 100 м від свердловини через 100 та 200 діб після початку відкачування?

Задача № 11.5

Визначити величину ділянки витікання на стінках свердловини в безнапірному потоці за такими даними:

Варіант	$H_{CT}, \text{ м}$	$H_D, \text{ м}$	$H_B, \text{ м}$	$Q, \text{ куб. м/дїб}$	$K, \text{ м/дїб}$	$r_c, \text{ м}$
1	117	112	105	120	5	0,108
2	117	112	105	120	3	0,108
3	117	112	105	120	10	0,108
4	117	112	105	120	2	0,108
5	117	112	105	100	5	0,108
6	117	112	105	150	5	0,108
7	117	112	105	130	5	0,108
8	115	112	105	120	5	0,108
9	117	110	105	120	5	0,108
10	117	112	100	120	5	0,108
11	120	115	108	120	5	0,108
12	117	112	105	120	5	0,2

H_{CT} – абсолютна відмітка статичного рівня в свердловині, H_D – абсолютна відмітка динамічного рівня у свердловині, H_B – абсолютна відмітка водотривкого шару, Q – дебіт свердловини, K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід, r_c – радіус свердловини.

Задача № 11.6

Визначити величину зниження гідродинамічного напору в свердловині при відкачуванні зі змінним дебітом в умовах напірного ізолюваного пласта зі сталою водопровідністю за такими даними:

$$Q_1 = 130 \text{ куб. м/добу}, \quad Q_2 = 87 \text{ куб. м/добу}, \quad t_1 = 10 \text{ дїб}, \quad t_2 = 20 \text{ дїб},$$

$$K = 5 \text{ м/добу}, \quad m = 20 \text{ м}, \quad \mu^* = 0,005, \quad r_c = 0,2 \text{ м}.$$

Задача № 11.7

Визначити величину зниження напору в точці М з координатами X та Y. Пласт напірний, ізолюваний, зі сталою водопровідністю, свердловина поблизу межі. Режим фільтрації неусталений. При визначенні скористатись схемою на рис. 14.8 [2] та такими даними:

Загальні дані: дебіт свердловини – $Q_1 = 130$ куб. м/дїб, час відкачування – $t = 30$ дїб, коефіцієнт фільтрації водовмісних порід – $K = 5$ м/дїб, потужність водоносного пласту – $m = 20$ м, коефіцієнт пружної ємності пласту – $\mu^* = 0,005$, відстань від свердловини до межі – $L = 500$ м.

Варіанти:

№	X	Y
1	800	100
2	600	200
3	200	200
4	1000	300
5	400	400
6	700	400
7	200	500
8	600	500
9	900	600
10	300	700
11	200	800
12	800	800

ТЕМА 12. ФІЛЬТРАЦІЯ В ЗОНІ ВПЛИВУ ВЗАЄМОДІЮЧИХ СВЕРДЛОВИН (ГРУПОВИХ ВОДОЗАБОРІВ)

Процеси фільтрації в районах дії груп свердловин. Особливості гідродинамічних розрахунків взаємодіючих свердловин в різних природних умовах і в зв'язку з технологією відкачувань.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що таке взаємодіючі водозабори?

Взаємодіючими називаються такі два чи кілька водозаборів, коли дебіт кожного зменшується при одночасному відкачуванні, порівняно з дебітом, що мав би місце при одиночній дії кожного з водозаборів. Суть взаємодії полягає в тому, що п'єзометричні (депресійні) поверхні, які створюються внаслідок дії окремих водозаборів, накладаються одна на одну.

2. Що таке групові водозабори?

Взаємодіючі водозабори утворюють групу, систему чи так званий груповий водозабір, якщо в межах площі, на якій розташовані взаємодіючі водозабори, виникає загальне поле зниження, а за її межами – загальна п'єзометрична (депресійна) воронка, розмір якої визначається груповим радіусом впливу $R_{ГР}$.

3. Який метод використовується при гідродинамічних розрахунках в зоні дії взаємодіючих свердловин?

При дії системи водозаборів із заданим дебітом у потоках зі сталою водопровідністю для отримання розрахункових залежностей використовують метод суперпозиції (накладання течій). Згідно з цим методом, зниження гідродинамічного напору в будь-якій точці поля зниження, що створюється під дією відкачування з системи водозаборів, визначається як сума знижень, викликаних дією кожної свердловини окремо.

4. Як виконується розрахунок взаємодіючих свердловин у необмеженому пласті при постійному дебіті свердловин?

Існують такі методи розрахунків:

- ◆ метод розрахунку дискретних свердловин;
- ◆ метод великого колодязя;
- ◆ метод узагальненої системи свердловин.

5. У чому полягає суть методу розрахунку дискретних свердловин?

Метод заснований на використанні методу суперпозиції та формули Тейса. Наприклад, для умов квазістаціонарної фільтрації маємо:

$$S = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot t}{r^2}. \quad (12.1)$$

Виходячи з методу суперпозиції, можна записати залежність для визначення зниження гідродинамічного напору S_M у точці M від дії n свердловин на час t :

$$S_M = \frac{Q_1}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot (t - t_1)}{r_1^2} + \dots \quad (12.2)$$

$$\dots + \frac{Q_n}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{2.25 \cdot a_n \cdot (t - t_n)}{r_n^2}$$

де Q_1, \dots, Q_n – дебїти свердловин із номерами 1, ..., n; r_1, \dots, r_n – відстані від точки M до свердловин із номерами 1, ..., n; t_1, \dots, t_n – час початку відкачування із свердловин з номерами 1, ..., n.

6. У чому полягає суть методу великого колодязя?

Якщо взаємодіючі свердловини розташовані по площі відносно рівномірно, то розрахунки можна виконати, розглядаючи групу свердловин як уявний великий колодязь з радіусом r_K . Радіус великого колодязя визначається за формулою:

$$r_K = \alpha^{2n} \sqrt{F^{n-1}}, \quad (12.3)$$

де α – коефіцієнт, що залежить від числа свердловин (визначається за допомогою відповідного графіка); F – площа, що зайнята системою свердловин; n – число свердловин.

7. Чому дорівнює дебїт великого колодязя?

Дебїт великого колодязя приймається рівним сумі дебїтів свердловин, що входять до нього.

8. Чи можна за методом великого колодязя визначити зниження гідродинамічного напору в окремій свердловині?

За методом великого колодязя можна визначити лише зниження в точці, що знаходиться за межами його радіусу. Зниження в окремій свердловині визначити не можна.

9. В чому полягає суть методу узагальної системи свердловин?

Метод запропонований Ф.Бочеве́ром. Реальна система свердловин замінюється на нескінчену множину джерел. Залежно від конкретної системи розташування свердловин ці джерела розподіляються рівномірно або по лінії, або по площі (лінійний ряд, кільцевий ряд чи сітка). Метод дозволяє виконувати розрахунки як в умовах необмежених пластів, так і в типових обмежених пластах.

10. Як визначається зниження гідродинамічного напору за методом узагальної системи свердловин?

Визначення ведеться за такою залежністю:

$$S = \frac{Q_{СУМ}}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot R_{УЗ}, \quad (12.4)$$

де $Q_{СУМ}$ – сумарний дебїт узагальної системи свердловин; $R_{УЗ}$ – величина зовнішнього гідравлічного опору, викликаного дією узагальної системи свердловин.

$R_{УЗ}$ залежить від розмірів ділянки розташування свердловин, умов на межах пласта, коефіцієнта п'єзопровідності (рівнепровідності) пласта, тривалості відкачування.

11. Як виконується розрахунок водозаборів у необмеженому пласті при змінному дебіті свердловини?

В цьому випадку зниження в точці на відстані r від свердловини на момент часу t слід розглядати як функцію змінного дебіту $S_r = f(Q_t)$. При цьому можуть мати місце такі залежності зміни дебіту:

- ◆ стрибкоподібна (ступінчаста) залежність;
- ◆ лінійна залежність;
- ◆ параболічна залежність;
- ◆ експоненційна залежність.

При стрибкоподібній залежності зміни дебіту весь розрахунковий період часу розбивається на n інтервалів, в межах яких дебіт є сталим. В цьому випадку зниження гідродинамічного напору в будь-який момент часу t від початку відкачування буде дорівнювати сумі знижень, викликаних стрибками дебіту.

Додаткові запитання до теми:

1. Які причини можуть викликати зміну дебіту свердловин?

Задача № 12.1

Визначити величину зниження гідродинамічного напору в точці M напірно-водоносного горизонту на момент часу $t = 50, 100, 150, 200$ діб внаслідок впливу 3-х взаємодіючих свердловин за такими даними:

Відстань від точки M до свердловини 1 дорівнює 300 м.

Відстань від точки M до свердловини 2 дорівнює 500 м.

Відстань від точки M до свердловини 3 дорівнює 600 м.

Дебіт свердловин однаковий і становить 540 куб. м/діб.

Коефіцієнт фільтрації водовмісних порід 5 м/діб.

Потужність пласту 20 м.

Коефіцієнт пружної водовіддачі пласту 0,002.

Задача № 12.2

Визначити сумарне зниження в свердловині 1 в результаті роботи 3-х взаємодіючих свердловин. Вихідні дані:

- ◆ загальна тривалість відкачування 270 діб;
- ◆ після роботи свердловини 1 протягом 150 діб в роботу були включені друга та третя свердловини, що працювали до кінця відкачування;
- ◆ дебіт свердловин однаковий і становить 50 куб. м/діб;
- ◆ коефіцієнт фільтрації водовмісних порід 5 м/діб;
- ◆ потужність пласту 20 м;
- ◆ коефіцієнт пружної водовіддачі пласту 0,002;
- ◆ свердловини розташовані по площі в лінію, по порядку їх номерів;
- ◆ відстань між свердловинами 1 та 2 дорівнює 200 м;
- ◆ відстань між свердловинами 2 та 3 дорівнює 200 м;
- ◆ діаметри свердловин однакові і становлять 0,2 м.

Задача № 12.3

Визначити величину сумарного зниження гідродинамічного напору в свердловині 1 в результаті роботи всіх свердловин в умовах неусталеної фільтрації, якщо загальна тривалість відкачування становить 150 діб. Дебіти свердловин 1, 2, 3

відповідно становлять Q_1 , Q_2 , Q_3 куб. м/діб. При цьому відомо, що перша свердловина працювала 150 діб. Друга свердловина почала роботу через 30 діб після початку відкачування. Третя свердловина почала роботу через 60 діб після початку відкачування. Відстань між першою та другою свердловинами становить 100 м. Відстань між другою та третьою свердловинами становить 150 м. Середня потужність пласта становить 20 м. Коефіцієнт фільтрації водовмісних порід 5 м/діб. Коефіцієнт пружної водовіддачі пласту 0,005. Величина напору над покрівлею пласта становить 25 м. Радіус свердловин однаковий і становить 0,108 м.

Варіант	Q_1	Q_2	Q_3
1	500	300	600
2	200	300	600
3	500	300	400
4	300	300	600
5	500	300	500
6	500	500	600
7	500	300	540
8	150	300	600
9	100	300	600
10	500	200	600
11	500	500	500
12	250	300	600

ТЕМА 13. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДАНИМИ РЕЖИМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Визначення параметрів водоносних горизонтів за даними спостережень за гідродинамічними напорами підземних вод (інтенсивності інфільтраційного живлення по площі, коефіцієнтів рівнепровідності та гравітаційної ємності, фільтраційного опору ложа водоїм і водотоків).

Головні питання та відповіді теми:

1. Що включає в себе поняття "параметр процесу фільтрації"?

Параметрами процесу фільтрації є коефіцієнти рівнянь фільтрації, що пов'язують конкретний процес фільтрації та диференціальне рівняння, що описує цей процес.

2. Які гідрогеологічні параметри можна визначати за даними режимних спостережень?

За даними режимних спостережень можна визначити інтенсивність інфільтраційного живлення по площі, коефіцієнт рівнепровідності для схеми напівобмеженого потоку, коефіцієнт гравітаційної водовіддачі, фільтраційний опір ложа водоїм і водотоків.

3. Що таке прямі й обернені задачі фільтрації підземних вод?

Прямою називається задача, коли за відомими гідрогеологічними параметрами та крайовими умовами визначається гідродинамічний напір H або витрата потоку Q підземних вод. Оберненою називається задача, коли за відомими значеннями гідродинамічного напору H та витрати потоку Q визнача-

ються гідрогеологічні параметри, крайові умови та уточнюється математична модель процесу фільтрації.

4. Які режимні спостереження необхідно мати для визначення величини інтенсивності живлення ґрунтових вод по площі в умовах усталеної фільтрації?

Для цього необхідно мати дані режимних спостережень по створу з трьох свердловин, що розташовані в напрямку потоку підземних вод. Крім цього, необхідно знати величину коефіцієнта фільтрації водовмісних порід.

5. Як визначається величина інтенсивності інфільтраційного живлення ґрунтових вод для схеми безнапірного потоку на горизонтальному водотривкому ложі в умовах усталеної фільтрації?

Визначення інтенсивності інфільтраційного живлення W ведеться за такою залежністю:

$$W = \left(\frac{h_2^2 - h_1^2}{L_{1-2} \cdot L_{2-3}} + \frac{h_1^2 - h_3^2}{(L_{1-2} + L_{2-3}) \cdot (L_{1-2} \cdot L_{2-3})} \right) \cdot K, \quad (13.1)$$

де h_1, h_2, h_3 – потужності потоку ґрунтових вод у свердловинах 1, 2 та 3; L_{1-2} – відстань між свердловинами 1 та 2; L_{2-3} – відстань між свердловинами 2 та 3; K – коефіцієнт фільтрації водовмісних порід.

6. Як визначається величина інтенсивності живлення ґрунтових вод по площі для необмеженого пласта в умовах неусталеної фільтрації?

За умови, що відома величина гравітаційної ємності породи, та живлення по площі є величиною сталою, можна скористатись залежністю О. Лебедева:

$$W = \mu \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (13.2)$$

де Δh – зміна рівня води у спостережній свердловині за час Δt .

7. Як визначається величина інтенсивності живлення ґрунтових вод по площі для напівобмеженого потоку при миттєвій зміні напору на межі в умовах неусталеної фільтрації?

Для такого випадку можна скористатись такою залежністю О. Лебедева:

$$W = \frac{\mu}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta H_{(x,\Delta t)} - \Delta H^0 \cdot \Phi(\lambda)}{1 - \Phi(\lambda)}, \quad (13.3)$$

$$\lambda = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_p \cdot \Delta t}}, \quad (13.4)$$

де ΔH^0 – величина миттєвої зміни гідродинамічного напору на межі потоку; x – відстань від межі потоку до спостережної свердловини; $\Delta H_{(x,\Delta t)}$ – величина зміни гідродинамічного напору в спостережній свердловині за час Δt ; $\Phi(\lambda)$ – функція, що визначається за допомогою таблиці.

Дану залежність можна застосувати за відомих значень коефіцієнта гравітаційної ємності μ та коефіцієнта рівнепровідності a_p .

9. За яких умов можливе визначення коефіцієнта рівнепровідності?

Визначення коефіцієнта рівнепровідності можна виконати для однорідного напівобмеженого безнапірного потоку, якщо відомі дані режимних спостережень

по створу, що складається не менш ніж з двох свердловин, розташованих за напрямом руху підземного потоку.

10. Які способи існують для визначення коефіцієнту рівнепровідності?

Визначення коефіцієнта рівнепровідності можна проводити способами М. Біндемана та В. Шестакова.

11. Як визначається коефіцієнт рівнепровідності способом В. Шестакова, якщо гідродинамічний напір на межі змінюється миттєво?

Відомо, що для умов напівобмеженого безнапірного потоку при миттєвій зміні гідродинамічного напору на межі справедлива така залежність (див. Тему 9):

$$\Delta H_{x,t} = \Delta H^0 \cdot F(x,t), \quad (13.5)$$

де $\Delta H_{x,t}$ – величина зміни гідродинамічного напору на відстані x від межі потоку на момент часу t ; ΔH^0 – величина зміни гідродинамічного напору на межі потоку; $F(x,t)$ – функція, вид і значення якої залежать від типу потоку та його характеристик (фільтраційних і ємнісних).

Якщо потік є напівобмеженим, $F(x,t) = \operatorname{erfc}(\lambda) = 1 - \operatorname{erf}(\lambda)$, де $\operatorname{erf}(\lambda)$ – еррор-функція, чи інтеграл імовірності Гауса.

$$\lambda = \frac{x}{2\sqrt{a_p \cdot t}}, \quad (13.6)$$

де x – відстань від межі потоку; a_p – коефіцієнт рівнепровідності пласта; t – час, на який визначається неусталений підпір.

З (13.5) маємо:

$$F(x,t) = \frac{\Delta H_{x,t}}{\Delta H^0}. \quad (13.7)$$

Знаходячи значення функції $F(x,t) = \operatorname{erfc}(\lambda)$ з таблиці та враховуючи (13.6), можна визначити коефіцієнт рівнепровідності за допомогою залежності:

$$a_p = \frac{x^2}{4 \cdot \lambda^2 \cdot t}. \quad (13.8)$$

12. Як можна визначити коефіцієнт гравітаційної ємності порід?

Для визначення коефіцієнта гравітаційної ємності беруться дані спостережень за рівнем підземних вод, коли живлення по площі відсутнє. Необхідно також знати коефіцієнт фільтрації водовмісних порід K та середню потужність потоку підземних вод h_{cep} . Спочатку визначають коефіцієнт рівнепровідності a_p . Потім застосовують таку залежність:

$$\mu = \frac{K \cdot h_{cep}}{a_p}. \quad (13.9)$$

13. Як за даними режимних спостережень визначається опір ложа водойми?

Потрібно мати створ спостережень свердловин, розташований перпендикулярно до річки, який складається не менш ніж з двох свердловин.

Для усталеного потоку з постійною водопровідністю за умови незмінної витрати потоку підземних вод опір ложа ΔL визначається за залежністю:

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_0}{H_2 - H_1} \cdot (x_2 - x_1) - x_1, \quad (13.10)$$

де H_0 – відмітка гідродинамічного напору у водоймі; H_1 – відмітка гідродинамічного напору у свердловині 1; H_2 – відмітка гідродинамічного напору у свердловині 2; x_1 – відстань від водойми до свердловини 1; x_2 – відстань від водойми до свердловини 2.

Для однорідного горизонтального безнапірного потоку вираз для ΔL має такий вигляд:

$$\Delta L = \frac{h_1^2 - h_0^2}{h_2^2 - h_1^2} \cdot (x_2 - x_1) - x_1, \quad (13.11)$$

де h_0 – потужність потоку на межі водойми; h_1 – потужність потоку у свердловині 1; h_2 – потужність потоку у свердловині 2; x_1 – відстань від водойми до свердловини 1; x_2 – відстань від водойми до свердловини 2.

Задача № 13.1

Визначити величину інтенсивності інфільтраційного живлення, якщо відомо, що на момент часу t_1 величина гідродинамічного напору в свердловині № 1 дорівнює 105 м, у свердловині № 2 – 110 м, № 3 – 100 м. Абсолютна відмітка водотривкого шару 95 м. Відстань від свердловини № 1 до свердловини № 2 дорівнює 1000 м. Відстань від свердловини № 2 до свердловини № 3 дорівнює 1000 м. Коефіцієнт фільтрації водовмісних порід 1 м/діб. Приймаючи умову, що величина інфільтраційного живлення є величиною сталою, визначити величину коефіцієнта гравітаційної водовіддачі, якщо відомо, що за 35 діб відбулась зміна гідродинамічного напору на межі потоку, при цьому величина гідродинамічного напору в свердловині № 1 становила 105,04 м.

Задача № 13.2

Визначити величину коефіцієнта рівнепровідності для умов напівобмеженого потоку при миттєвій зміні напору на його межі за такими даними: ΔH^1 – величина зміни рівня води у спостережній свердловині; ΔH^0 – величина зміни рівня води на межі потоку (річка); X – відстань від спостережної свердловини до межі потоку; t – час, за який відбулась зміна рівня у свердловині після зміни рівня на межі.

Варіант	ΔH^1 , м	ΔH^0 , м	X , м	t , діб
1	0,25	0,5	300	30
2	0,5	0,7	165	30
3	0,35	0,48	150	30
4	0,2	0,5	350	30
5	0,5	0,82	225	30
6	0,41	0,5	100	30
7	0,25	0,6	350	30
8	0,55	0,75	150	30
9	0,25	0,45	280	30
10	0,25	0,6	300	30

11	0,4	0,63	215	30
12	0,25	0,45	270	30

Задача № 13.3

Визначити величину опору ложа водойми в умовах однорідного безнапірного потоку на горизонтальному водотриві за такими даними: h_0 – зафіксована величина потужності потоку на межі з водоймою на момент часу t ; h_1 – зафіксована величина потужності потоку в свердловині № 1 на момент часу t ; h_2 – зафіксована величина потужності потоку в свердловині № 2 на момент часу t ; X_1 – відстань від водойми до свердловини № 1; X_2 – відстань від водойми до свердловини № 2.

Варіант	h_0 , м	h_1 , м	h_2 , м	X_1 , м	X_2 , м
1	10	12	15	50	200
2	10	12	15	50	250
3	10	12	15	60	300
4	10	12	15	40	150
5	10	12	15	30	120
6	10	12	15	25	150
7	10	12	15	50	180
8	10	12	15	40	150
9	10	12	15	20	145
10	10	12	15	15	85
11	10	12	15	10	50
12	10	12	15	25	150

ТЕМА 14. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДАНИМИ ДОСЛІДНО-ФІЛЬТРАЦІЙНИХ РОБІТ

Методи визначення гідрогеологічних параметрів водоносних горизонтів за даними дослідно-фільтраційних робіт. Характеристика методів простеження: за часом, за площею та комбінованого.

Головні питання та відповіді теми:

1. Які види гідрогеологічних робіт належать до дослідно-фільтраційних:

- ◆ відкачування зі свердловин;
- ◆ нагнітання в свердловини;
- ◆ наливи в шурфи.

Основним видом дослідно-фільтраційних робіт є відкачування зі свердловин.

2. Які гідрогеологічні параметри можна визначити за даними дослідно-фільтраційних робіт?

Можна визначити коефіцієнти водопровідності, рівнепровідності, п'єзопровідності, гравітаційної водовіддачі, пружної водовіддачі пласта, а також коефіцієнт фільтрації та ряд інших характеристик водоносних горизонтів і комплексів.

3. Що таке відкачування?

Це спосіб примусового відбору підземних вод зі свердловин, колодязів, шурфів, шахт, що викликає деформацію природного поля гідродинамічних напорів. Чим більш тривалим є відкачування, тим більш інформативним є дослідження.

4. Як поділяються відкачування залежно від їх цільового призначення?

Залежно від призначення розрізняють пробні, дослідні та дослідно-експлуатаційні відкачування.

5. Як поділяються відкачування залежно від наявності чи відсутності спостережних свердловин?

За таким поділом розрізняють одиночні та кушові відкачування.

6. Що таке пробні відкачування?

Пробні відкачування виконуються з метою попередньої оцінки фільтраційних властивостей водовмісних порід і якісних характеристик підземних вод, а також для отримання порівняльної характеристики різних ділянок водоносного горизонту.

7. Що таке дослідні одиночні та дослідні кушові відкачування?

Це основний вид дослідно-фільтраційних робіт, що виконується на різних стадіях гідрогеологічних вишукувань.

Дослідні одиночні відкачування виконуються для встановлення взаємозв'язку між дебітом свердловини та зниженням гідродинамічного напору в ній. Тому такі відкачування проводяться з 2-3 ступенями дебіту.

Дослідні кушові відкачування виконуються для визначення гідрогеологічних параметрів, граничних умов, дослідного визначення величин "зрізок" гідродинамічного напору в свердловинах. Різновидністю кушових відкачувань є дослідні групові, які проводяться у випадках, коли відбір води з однієї свердловини не може забезпечити необхідної точності розрахунків внаслідок наявності незначних величин зниження гідродинамічного напору.

8. Що таке дослідно-експлуатаційні відкачування?

Дослідно-експлуатаційні відкачування з однієї або кількох свердловин проводяться тільки на стадії детальних вишукувань у складних гідрогеологічних і гідрогеохімічних умовах, які не можуть бути відображені у вигляді аналітичної розрахункової схеми. Мета дослідно-експлуатаційних відкачувань – практичне виявлення закономірностей зміни гідродинамічних напорів підземних вод та їх якості при заданому водовідборі.

9. Які методи використовуються для визначення гідрогеологічних параметрів за даними відкачувань?

Використовуються такі методи:

- ◆ метод підбору;
- ◆ метод еталонних кривих;
- ◆ методи простеження.

Методи простеження в свою чергу поділяються на простеження за часом, простеження по площі та комбіноване простеження.

Головним чином методи базуються на використанні рівняння Ч. Тейса.

10. Для яких умов можна застосовувати рівняння Ч. Тейса?

Рівняння Ч. Тейса застосовується в умовах напірного необмеженого ізолюваного пласту зі сталою водопровідністю. Дебіт відкачування при цьому є сталою величиною. За певних обмежень його можна застосувати і для умов безнапірного пласта.

11. У чому полягає суть методу підбору?

Якщо за результатами відкачування відомі значення знижень гідродинамічного напору в спостережній свердловині S_1 та S_2 на моменти часу t_1 та t_2 , за умови сталих дебіта відкачування Q та коефіцієнта водопровідності пласта T , можна записати:

$$S_1 = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t_1}\right), \quad (14.1)$$

$$S_2 = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t_2}\right), \quad (14.2)$$

де r – відстань від свердловини, з якої здійснюється відкачування, до спостережної, де фіксується зниження гідродинамічного напору; a_n – коефіцієнт п'єзопровідності пласта.

Розділивши (14.2) на (14.1), маємо:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t_2}\right)}{W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t_1}\right)}, \quad (14.3)$$

Знаючи відстань до спостережної свердловини r та підставивши у (14.3) відомі значення знижень S та часу t , можна шляхом підбору визначити величину коефіцієнта п'єзопровідності a_n . Знаючи коефіцієнт п'єзопровідності, можна визначити коефіцієнт водопровідності T :

$$T = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot S_1} \cdot W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t_1}\right). \quad (14.4)$$

Коефіцієнт пружної водовіддачі пласта визначається за залежністю:

$$\mu^* = \frac{T}{a_n}. \quad (14.5)$$

12. У чому полягає суть методу еталонної кривої?

Метод заснований на логарифмуванні рівняння Ч.Тейса:

$$\ln(S) = \ln\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\right) + \ln(W(u)), \quad (14.6)$$

$$u = \frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t},$$

а також виразу для $\frac{1}{u}$:

$$\ln\left(\frac{1}{u}\right) = \ln(4 \cdot a_n) + \ln\left(\frac{t}{r^2}\right). \quad (14.7)$$

З наведених рівнянь видно, що $\ln(S)$ та $\ln\left(W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t}\right)\right)$ відрізняються між собою на величину $\ln\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\right)$, а $\ln\left(\frac{1}{u}\right)$ та $\ln\left(\frac{t}{r^2}\right)$ відрізняються на величину $\ln(4 \cdot a_n)$.

Якщо побудувати графіки:

$$\ln(S) = f\left(\ln\left(\frac{t}{r^2}\right)\right) \text{ та} \quad (14.8)$$

$$\ln\left(W\left(\frac{r^2}{4 \cdot a_n \cdot t}\right)\right) = f\left(\ln\left(\frac{4 \cdot a_n \cdot t}{r^2}\right)\right), \quad (14.9)$$

тобто, так звану еталонну криву:

$$\ln(W(u)) = f\left(\ln\left(\frac{1}{u}\right)\right), \quad (14.10)$$

видно, що графіки збігаються при накладанні за умови, що осі координат зсунуті між собою на величини $\ln\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\right)$ та $\ln(4 \cdot a_n)$.

При практичному застосуванні методу еталонної кривої саму еталонну криву (14.10) будують за даними таблиці $W(u)$, а графік (14.8) – за даними конкретного відкачування. Графіки накладають один на другий таким чином, щоб досягти найбільшої збіжності. Потім за даними зсуву осей графіків визначаються коефіцієнти водопровідності T та п'єзопровідності a_n пласта.

13. Які методи простеження використовуються для визначення гідрогеологічних параметрів?

Для визначення основних гідрогеологічних параметрів використовуються методи простеження за часом, по площі та комбінованого простеження.

14. Які головні умови застосування методів простеження?

Головні умови застосування методів простеження:

- ◆ дебіт відкачування має бути сталим;
- ◆ режим фільтрації має бути квазістаціонарним.

15. Як практично застосовується метод простеження за часом?

Метод базується на використанні формули Ч.Тейса. Будується графік залежності зниження гідродинамічного напору в спостережній свердловині залежно від логарифму часу – $S = f(\ln t)$. На графіку визначається прямолінійна ділянка (яка відповідає квазістаціонарному режиму фільтрації). Для цієї ділянки записується рівняння в напівлогарифмічних координатах такого вигляду:

$$S = A_i + C_i \cdot \ln(t), \quad (14.11)$$

де A_i – початкова ордината, що відсікається прямолінійним графіком на осі ординат при значенні $\ln(t) = 0$; C_i – кутовий коефіцієнт прямолінійного графіка.

Маючи C_t та A_t , можна визначити коефіцієнти водопровідності T та п'є-зопровідності a_n пласта:

$$T = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot C_t}, \quad (14.12)$$

$$a_n = e^{\frac{A_t}{C_t} - \ln\left(\frac{2,25}{r^2}\right)}, \quad (14.13)$$

де Q – дебіт відкачування; r – відстань від свердловини, з якої здійснюється відкачування, до спостережної.

Додаткові запитання до теми:

1. В чому суть методу простеження по площі?
2. В чому суть методу комбінованого простеження?

Задача № 14.1

Визначити геофільтраційні параметри пласта (T, a_n, μ^*) за даними дослідно-фільтраційних робіт методом підбору (S - зниження; t - час).

Варіант	$S_1, \text{м}$	$S_2, \text{м}$	$t_1, \text{діб}$	$t_2, \text{діб}$
1	1,13	1,24	8	10
2	1,1	1,16	8	9
3	1,35	1,48	8,5	10,5
4	1,15	1,21	9	10
5	0,75	0,83	8	10
6	0,95	1,04	8	10
7	0,96	1,05	9	11
8	1,08	1,18	8	10

Задача № 14.2

Визначити геофільтраційні параметри (T, a_p, μ) за даними кушового відкачування методом простеження за часом:

Загальні дані (r - відстань до спостережної свердловини; S - зниження; t - час):

$r, \text{м}$	10	20	30	50
$t, \text{добы}$	$S_1, \text{м}$	$S_2, \text{м}$	$S_3, \text{м}$	$S_4, \text{м}$
0,5	1,34	0,7	0,3	0,11
1	1,67	1,03	0,65	0,28
2	2,02	1,34	0,96	0,52
3	2,22	1,53	1,15	0,68
4	2,36	1,68	1,29	0,81
5	2,46	1,79	1,39	0,91
6	2,58	1,93	1,51	1,03
8	2,7	2,03	1,62	1,13
10	2,82	2,16	1,73	1,24

Варіанти:

Варіант	$Q, \text{куб. м/діб}$	$r, \text{м}$
---------	------------------------	---------------

1	1000	10
2	1350	20
3	1300	30
4	1200	50
5	1200	10
6	1000	20
7	1200	30
8	1300	50
9	1100	10
10	1350	20
11	1250	30
12	1150	50

ТЕМА 15. ОСОБЛИВОСТІ МІГРАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Поняття міграції підземних вод. Складові процесу міграції та фактори, що викликають цей процес. Механізм основних видів процесу міграції в підземних водах.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що таке "міграція підземних вод"?

Це процеси переносу тепла та речовин у підземних водах, коли розглядається переміщення окремих часток рідини по порах і тріщинах гірських порід з урахуванням фізико-хімічних змін рідини та її компонентів. Ці зміни відбуваються при фільтрації за рахунок взаємодії рідини з гірськими породами та іншими рідинами.

2. Які види течії виділяють у ДПВ у зв'язку з розглядом процесу міграції підземних вод?

При розгляді процесів міграції підземних вод, із врахуванням стану середовища, в якому рухається рідина, розглядаються гравітаційні, елізійні та змішані течії.

3. Що таке "гравітаційні течії"?

Це течії, що виникають у зв'язку зі зміною по площі розповсюдження водоносних горизонтів гідродинамічного напору, а також внаслідок нерівномірного розподілу густини, температури та концентрації рідин у водоносних горизонтах.

4. Що таке "елізійні течії"?

Такі течії виникають за рахунок зміни об'єму порового простору та рідини, що міститься у порах. Така зміна об'єму може бути спричинена тектонічним тиском, тиском розташованих вище гірських порід, або процесами мінералогічного перетворення середовища.

5. Що таке "змішані течії"?

В таких течіях гравітаційна та елізійна складові проявляються одночасно.

6. Які існують механізми міграції підземних вод?

Існує конвекційний та кондуктивний перенос.

7. Що таке "конвекційний перенос"?

Це перенос тепла та маси речовини потоком рідини, що рухається (фільтраційним потоком).

8. Що таке "кондуктивний перенос"?

Це перенос тепла та маси речовини дифузійним (молекулярним) шляхом у нерухомій рідині.

9. Що таке "гідродисперсія"?

У зв'язку з тим, що процеси міграції ускладнюються неоднорідністю порового середовища, в процесі фільтрації рідини має місце інтенсивне перемішування часток води, що обумовлює специфічні умови одночасної дії конвекційного та кондуктивного переносу. Такий механізм отримав назву гідродинамічної дисперсії, або конвективної дифузії.

10. Які поняття розглядаються у зв'язку із застосуванням в розрахунках механізму конвекційного переносу?

Для запису балансу солей у нескінченно малому елементі трубки току використовують поняття дійсної швидкості фільтрації підземних вод (v_d), активної пористості породи (n_a), адсорбційної ємності порід (N), концентрації компонента в підземних водах (C). Як базова розглядається схема поршневого витискання рідини.

11. Як оцінюється дифузійний перенос при розгляді процесів міграції?

Величина дифузійного потоку Q_d визначається за законом Фіка:

$$Q_d = -D_M \cdot \omega \cdot \frac{\partial C}{\partial l}, \quad (15.1)$$

де D_M – коефіцієнт молекулярної дифузії; ω – площа поперечного перерізу; l – відстань.

12. Як визначається коефіцієнт молекулярної дифузії?

Коефіцієнт молекулярної дифузії визначається за залежністю:

$$D_M = \chi \cdot n_a \cdot D_M^0, \quad (15.2)$$

де D_M^0 – коефіцієнт молекулярної дифузії у вільному середовищі; χ – параметр, що характеризує звивистість шляхів фільтрації (для зцементованих пісків дорівнює від 0,25 до 0,5, для незцементованих – від 0,5 до 0,7); n_a – активна пористість породи.

13. Для яких умов закон Фіка є справедливим?

Він справедливий для умов, коли процес відбувається в ізотермічних умовах, а дифузія незалежна від температури. Інакше має місце явище неізотермічної багатокомпонентної дифузії.

14. Як оцінюється гідродисперсія при розгляді процесів міграції?

Гідродисперсія може бути оцінена за допомогою таких самих залежностей, що і молекулярна дифузія. Проте в залежностях замість коефіцієнту молекулярної дифузії D_M тут використовується коефіцієнт дисперсії D :

$$D = D_M + \delta_1 \cdot v, \quad (15.3)$$

де δ_1 – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту; v – швидкість фільтрації.

ТЕМА 16. ОСНОВИ ПЕРЕНОСУ ВОЛОГИ В ЗОНІ АЕРАЦІЇ

Зона аерації та процеси, що відбуваються в ній у зв'язку з переносом вологи. Процеси та явища, що мають місце в насичених, ненасичених та квазінасичених ґрунтах. Математична модель переносу вологи в ненасичених ґрунтах.

Головні питання та відповіді теми:

1. Що таке "зона аерації"?

Це простір між поверхнею землі та поверхнею першого постійного водоносного горизонту (горизонту з вільною поверхнею). Зона аерації являє собою багатофазну систему – ґрунт, вода як розчин, повітря.

2. В якому стані може знаходитись повітря в зоні аерації?

Повітря тут може знаходитись у вільному, затиснутому, розчиненому та адсорбованому стані.

3. В якому стані може знаходитись вода в зоні аерації?

Вода ту може знаходитись у вигляді рідини, льоду та пару.

4. Які області розподілу вологи виділяють у зоні аерації?

Виділяють верхню область активного вологообміну, середню область невеликої вологості, нижню область високої вологості.

5. Які типи стану ґрунту виділяють у зоні аерації?

Виділяють насичений, ненасичений, квазінасичений стани ґрунту.

6. Який стан ґрунту називають насиченим?

Це стан, коли вологість ґрунту відповідає його повній вологоємності. Має місце двохфазна система – ґрунт і вода, повітря відсутнє. Рух води відбувається за рахунок сили тяжіння, тобто має місце процес фільтрації відповідно до закону Дарсі.

7. Який стан ґрунту називають ненасиченим?

Це стан, коли вологість ґрунту менша, ніж його повна вологоємність. Має місце трьохфазна система – ґрунт, вода й повітря. Повітря в порах створює безперервну фазу і має зв'язок з атмосферою. Тиск у воді, поблизу поверхні розділу вода-повітря, є меншим, ніж тиск у повітрі (атмосферний тиск). Вода в ненасичених ґрунтах не є вільною, не передає гідростатичного тиску, не витікає. Вона переміщується в ґрунті під дією внутрішніх сил і сили гравітації.

8. Який стан ґрунту називають квазінасиченим?

Це стан, коли вологість ґрунту менша, ніж його повна вологоємність. Має місце трьохфазна система – ґрунт, вода та повітря. Проте повітря знаходиться у затиснутому стані. Такий стан виникає в зоні коливаних рівня ґрунтових вод, а також в зоні аерації при інтенсивному просочуванні вологи зверху. Водопроникність породи тут залежить від кількості затиснутого повітря, яка поступово зменшується в зв'язку з процесом розчинення повітря у воді.

9. Що таке повний термодинамічний потенціал вологи?

Це робота, що має бути витрачена (в розрахунку на 1 г чистої води) для того, щоб зворотно та ізотермічно перенести у певну точку ґрунту нескінченно

малу кількість води, яка знаходиться на умовному висотному рівні порівняння за умови атмосферного тиску. Виражається такою залежністю:

$$G = G_T + G_Z, \quad (16.1)$$

де G_T – потенціал тензометричного тиску вологи; G_Z – гравітаційний потенціал вологи.

10. Що таке гравітаційний потенціал вологи?

Це робота сили тяжіння, яка віднесена до маси; визначається за залежністю:

$$G_Z = g \cdot Z, \quad (16.2)$$

де Z – відстань від площини порівняння до точки, що розглядається; g – прискорення сили тяжіння.

11. Що таке потенціал тензометричного тиску?

Це робота сил тиску, яка віднесена до маси; визначається за залежністю:

$$G_T = \frac{P}{\rho}, \quad (16.3)$$

де P – тиск; ρ – густина рідини.

12. Що означають поняття "всмоктуючий тиск" та "всмоктуюча висота"?

У ненасичених ґрунтах тиск (P_e), що виражає дію внутрішніх сил, завжди є від'ємним по відношенню до атмосферного, який прийнятий за нульовий. Такий тиск називається всмоктуючим, а вираз:

$$h_e = \frac{P_e}{\gamma} \quad (16.4)$$

має назву висоти всмоктування (тут γ – об'ємна маса рідини).

13. Як формулюється закон переносу вологи?

Він формулюється за аналогією із законом Дарсі:

$$V_e = -K(\Theta) \cdot \frac{\partial H_{nc}}{\partial z}, \quad (16.5)$$

де $K(\Theta)$ – коефіцієнт переносу вологи; H_{nc} – повний гідродинамічний напір ненасиченого стану ґрунту; z – координата.

14. В чому суть поняття "коефіцієнт переносу вологи"?

$K(\Theta)$ – це характеристика вологопровідності ненасиченого ґрунту. Максимального значення він досягає за повного насичення ґрунту водою, і в такому випадку відповідає коефіцієнту фільтрації. Розмірність коефіцієнту переносу вологи м/діб.

15. Що таке основна гідрофізична характеристика ґрунту?

Це залежність всмоктуючого тиску в ґрунті (P_e) від вологості ґранту. Вона дозволяє оцінити енергетичний стан води у ґрунті та пов'язати величину повного гідродинамічного напору ненасиченого стану ґрунту з величиною вологості ґрунту, всмоктуючого тиску ґрунту, висотою всмоктування та з іншими параметрами переносу вологи в ґрунті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гавич И.К. Гидрогеодинамика. – М.: Недра, 1988.
2. Жернов И.Е. Динамика подземных вод. – К.: Вища школа, 1982.
3. Кошляков О.Є., Мокієнко В.І. Динаміка підземних вод. Головні поняття та визначення. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет, 2004.
4. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. – М.: Недра, 1983.
5. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1973.
6. Шестаков В.М., Кравченко И.П., Пашковский И.С. Практикум по динамике подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1975.

ЗМІСТ

Вступ	3
Тема 1. Основи динаміки водних потоків. Струмениста модель руху рідини	5
Тема 2. Закони фільтрації.....	9
Тема 3. Ємнісні властивості гірських порід	15
Тема 4. Потоки підземних вод	18
Тема 5. Вихідні диференціальні рівняння фільтрації.....	23
Тема 6. Основні диференціальні рівняння планової фільтрації.....	27
Тема 7. Методи розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації	32
Тема 8. Аналітичні розрахунки усталених одномірних потоків підземних вод	34
Тема 9. Фільтрація в зоні впливу гідротехнічних споруд	39
Тема 10. Фільтрація в зоні впливу горизонтальних водозаборів	43
Тема 11. Фільтрація в зоні впливу одиночних вертикальних водозаборів (свердловин)	50
Тема 12. Фільтрація в зоні впливу взаємодіючих свердловин (групових водозаборів).....	59
Тема 13. Визначення гідрогеологічних параметрів за даними режимних спостережень.....	62
Тема 14. Визначення гідрогеологічних параметрів за даними дослідно-фільтраційних робіт	66
Тема 15. Особливості міграції підземних вод	71
Тема 16. Основи переносу вологи в зоні аерації.....	73
Список літератури.....	75

