

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**



**ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра гідрогеології та інженерної геології**

**ОДИНОЧНІ ДОСКОНАЛІ СВЕРДЛОВИНИ
ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ В УМОВАХ КРУГОВОГО КОН-
ТУРУ ЖИВЛЕННЯ. ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ
Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни
«Динаміка підземних вод»**

для студентів напрямку підготовки 6.040103 Геологія

Дніпропетровськ
2012

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

**ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра гідрогеології та інженерної геології**

**ОДИНОЧНІ ДОСКОНАЛІ СВЕРДЛОВИНИ
ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ В УМОВАХ КРУГОВОГО КОН-
ТУРУ ЖИВЛЕННЯ. ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ
Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни
«Динаміка підземних вод»**

для студентів напрямку підготовки 6.040103 Геологія

Дніпропетровськ
НГУ
2012

Одиночні досконалі свердловини при нестационарному режимі в умовах кругового контуру живлення. Гідрогеологічні розрахунки. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Динаміка підземних вод» для студентів напряму підготовки 6.040103 / О.О. Федоренко, Є.А. Шерстюк. – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 21 с.

Автори:

О.О. Федоренко, ст. викл. (розділи 1–3);

Є.А. Шерстюк, асист. (розділ 4).

Затверджено до видання редакційною радою НГУ (протокол № 3 від 15.11.2011) за поданням методичної комісії напряму підготовки 6.040103 Геологія (протокол № 1 від 18.10.2011р.)

Викладено вказівки призначено для самостійної роботи студентів напряму 6.040103 Геологія під час вивчення нормативної дисципліни «Динаміка підземних вод».

Наведені основи методики розрахунків дебітів, знижень та інших гідродинамічних параметрів досконалих артезіанських, ґрунтових та ґрунтово-артезіанських вертикальних свердловин в умовах нестационарного режиму фільтрації. Наведено задачі для засвоєння матеріалу та приклади їх розв'язання.

Орієнтовано на підвищення ефективності самостійної роботи студента.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри гідрогеології та інженерної геології д-р техн. наук, проф. І.О. Садовенко.

Зміст

Вступ	4
1. Відкачки при постійному зниженні або дебіті.....	4
2. Основні рівняння нестационарної планово-радіальної фільтрації.....	5
2.1. Сverdловина в напірному горизонті.....	5
2.2. Сverdловина в безнапірному горизонті.....	12
3. Визначення коефіцієнта фільтрації та p' езопровідності (рівнепровідності).....	13
4. Методичні рекомендації до розв'язання задач.....	16
Список літератури.....	20
Додатки.....	21

Вступ

Усталений (стаціонарний) рух характеризується постійністю в часі основних параметрів потоку (потужність, швидкість, гідравлічний напір). У природних же умовах ці параметри, як правило, змінюються, тобто спостерігається неусталений (нестационарний) рух підземних вод. Причиною таких змін можуть бути: нерівномірна фільтрація атмосферних опадів; коливання рівнів води в поверхневих водоймах, гідравлічно пов'язаних із підземними водами; господарча діяльність людини (зрошення, осушення тощо).

У даних методичних вказівках наведені основи методики розрахунків дебітів та знижень у досконалих артезіанських, ґрунтових і ґрунтово-артезіанських свердловинах в умовах нестационарного режиму фільтрації.

Навчальна мета цих методичних вказівок – розглянути і вивчити теоретичні основи методики розрахунків досконалих свердловин, а також приклади розрахунку в конкретних гідрогеологічних умовах.

1. Відкачки при постійному зниженні або дебіті

Відкачки в умовах несталого режиму фільтрації можуть проводитися при постійному зниженні рівня води в свердловині або при постійному її дебіті. Припустимо, що воронка депресії, викликана відкачкою, проводиться з постійним зниженням рівня в свердловині (рис. 1, а) через деякий час поширилася до точки А (як приклад розглядається безнапірний горизонт).

Ухил природного потоку менше ухилу, що утвориться всередині воронки депресії, тому приплив води з області живлення до точки А завжди менший, ніж відтік від неї в напрямку свердловини. Тому розвиток депресії не може обмежуватися точкою А, адже потік, спрямований до точки А, повинен мати більший ухил, ніж той, який він мав у природному стані, щоб компенсувати відтік від цієї точки до свердловини. Отже, у процесі відкачки межа депресії повинна послідовно поширюватися. Розвиток депресійної воронки на площі зменшує ухил потоку, що формується в її межах, тому дебіт свердловини при відкачці з постійним зниженням безупинно зменшується в часі.

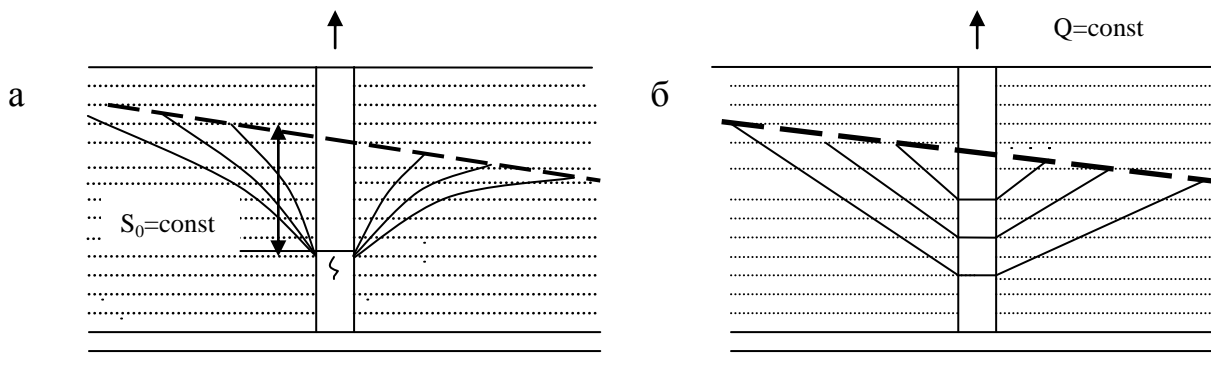


Рис. 1. Схеми розвитку воронки депресії при несталому режимі фільтрації:
а – відкачка при постійному зниженні в свердловині;
б – відкачка при постійному дебіті свердловини

Відзначимо для порівняння, що при сталому режимі фільтрації воронка депресії, що сформувалася, обмежується, наприклад, точкою A_1 . При цьому відтік від цієї точки до свердловини, компенсується не припливом до точки A_1 з боку області, що розташовується за межами депресійної воронки, а за рахунок додаткового живлення (інфільтрація атмосферних опадів, перелив із сусідніх горизонтів і т. п.), що надходить у даний водоносний горизонт, безпосередньо на площі, яку займає ця воронка. Тому збільшення в часі її розмірів припиняється.

Нехай тепер відкачка в умовах несталого руху підземних проводиться з постійним дебітом, причому депресія на той або інший момент часу поширюється до точки A (рис. 1, б). Переміщення її до точки A_1 обов'язково викликає додаткове зниження рівня води у свердловині, тому що в протилежному випадку дебіт свердловини мав б зменшитися внаслідок зменшення ухилу поверхні депресії, що не відповідало б умові сталості дебіту. Таким чином, при відкачці з постійним дебітом рівень води в свердловині повинен безупинно знижуватися в часі, тобто має збільшуватися зниження S_0 .

На практиці у зв'язку з поширенням артезіанських заглибних насосів свердловини найчастіше експлуатують при постійному дебіті. Такий же передумові, як правило, відповідають гідрогеологічні розрахунки свердловин. Тому далі розглядатимуться основні рішення для свердловин стосовно умови сталості їх витрат у часі.

2. Основні рівняння нестационарної планово-радіальної фільтрації

2.1. Свердловина в напірному горизонті

Основну задачу нестационарної планово-радіальної фільтрації вперше розв'язав американський учений Тейс (1935) на основі аналогії між поширенням тепла в провіднику і розвитком збурювань у напірному горизонті, викликаних відкачкою. Він одержав формулу для визначення зниження рівня S у будь-якій точці горизонту в будь-який момент часу t :

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \cdot \left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \right], \quad (1)$$

звідки

$$Q = \frac{4\pi kmS}{-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)}, \quad (2)$$

де S – зниження рівня води в будь-якій точці радіального потоку при відкачці зі свердловини, м; Q – постійний дебіт свердловини, м³/доб; r – відстань від осі свердловини до точки, у якій визначається зниження рівня (під час визначення зниження рівня у свердловині $r = r_0$), м; a – коефіцієнт п'єзопровідності, м²/доб;

k – коефіцієнт фільтрації, м/доб; m – потужність напірного горизонту, м; E_i – експонентна функція.

Теоретичні умови застосування формули (1) і рівняння (2), що впливає з неї:

1 – горизонт є напірним, однорідним (з постійною водопровідністю $T = km$), ізольованим (інфільтрація і перетікання через слабопроникні горизонти відсутні) і необмеженим за розмірами;

2 – дебіт свердловини Q є постійним;

3 – свердловина, з якої здійснюється відкачка, є досконалою.

У закордонній літературі спеціальна функція $-E_i(-\frac{r^2}{4at})$ позначається че-

рез $W(u)$, де $u = \frac{r^2}{4at}$, і називається «функцією колодязя» (well-function), тобто

$W(u) = -E_i(-u)$ (3). У цьому випадку рівняння Тейса (1) запишемо так:

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

і

$$Q = \frac{4\pi km S}{W(u)}. \quad (5)$$

Числові значення функції $W(u) = -E_i(-u)$ залежно від аргументу u подаються у спеціальних таблицях (додаток 1).

З цих таблиць і графіків видно, що функція $W(u)$, зменшується зі збільшенням аргументу $u = \frac{r^2}{4at}$.

Функцію $W(u) = -E_i(-u)$ можна записати так:

$$W(u) = -0,577 + \ln \frac{1}{u} + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} - \frac{u^4}{96} + \dots, \quad (6)$$

де 0,577 – стала Ейлера.

При малих значеннях аргументу, коли $u = \frac{r^2}{4at} \leq 0,05 \dots 0,1$ (7), можна знехтувати всіма членами ряду (6), починаючи з третього, як величинами, малими порівняно з двома першими членами ряду, тобто можна приблизно вважати, що:

$$W(u) = -E_i(-u) = \ln \frac{1}{u} - 0,577. \quad (8)$$

Замінивши величину $-0,577$ на її логарифм $-0,577 = -\ln 1,78$, знайдемо, що:

$$W(u) = \ln \frac{1}{u} - \ln 1,78 \quad (9) \quad \text{або} \quad W(u) = \ln \frac{1}{u \cdot 1,78} \quad (10)$$

$$\text{З огляду на те, що } u = \frac{r^2}{4at}, \text{ отримаємо } W(u) = \ln \frac{4at}{1,78r^2} = \ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad (11)$$

Таким чином, при малих значеннях аргументу u функцію $W(u) = -E_i(-u)$ можна замінити зворотною стосовно неї логарифмічною функцією. У цьому випадку рівняння (4) набуває вигляду:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad (12)$$

Переходячи до десяткових логарифмів і з огляду на те, що $\frac{2,3}{4\pi} = 0,183$, в остаточному виді маємо:

$$S = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2}. \quad (13)$$

У теорії несталого руху радіального потоку підземних вод ця формула основна для розрахунку зниження рівня води в будь-якій точці напірного горизонту, необмеженого за простяганням, при відкачці з постійним дебітом.

При визначенні зниження в свердловині рівняння (13) набуває вигляду:

$$S_0 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r_0^2}. \quad (14)$$

При заміні функції $W(u)$ її логарифмічним наближенням похибка визначення знижень рівня при відкачках звичайно не перевищує 5 %.

Зниження рівня води в деякій точці напірного горизонту, розраховане за формулою (13), дорівнюватиме нулю в тому випадку, якщо, $\frac{2,25at}{r^2} = 1$, (15), тобто коли логарифм цього вираження дорівнює нулю. Позначивши відстань, на якій ця умова дотримується в той або інший момент часу, через R_n (тобто в рівнянні (14) прийемо $R_n = r$), тоді одержимо, що

$$R_{II} = 1,5\sqrt{at}. \quad (16)$$

Величина R_n названа В.Н. Щелкачовим *приведеним радіусом впливу* свердловини; її також називають умовним радіусом живлення. Приведений радіус впливу є розрахунковим показником, який характеризує режим відкачки в горизонті, що ізольований водотривкими покрівлею й подошвою та має безмежне поширення по площі.

З урахуванням того, що $R_{II}^2 = 2,25at$ формулу (13) можна записати так:

$$S = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2} = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{R_{II}^2}{r^2} = \frac{0,183Q}{km} \cdot 2 \cdot \lg \frac{R_{II}}{r} = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{R_{II}}{r}, \quad (17)$$

а замінивши R_{II} на $1,5\sqrt{at}$, отримаємо:

$$S = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{1,5\sqrt{at}}{r}. \quad (18)$$

Для визначення зниження рівня у свердловині при $r = r_0$, маємо:

$$S_0 = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{R_{II}}{r_0}. \quad (19)$$

Бачимо, що ця формула ідентична формулі Дюпюї для сталого режиму фільтрації:

$$S_0 = \frac{Q \lg \frac{R}{r_0}}{2,73km} = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{R}{r_0}, \quad (20)$$

але при заміні постійного радіуса впливу R приведеним радіусом впливу R_n , що залежить від коефіцієнта п'єзопровідності a і часу t .

Іншими словами, рівняння Тейса, виведене для несталого руху радіального потоку підземних вод з напірною поверхнею, можна замінити за умови $\frac{r^2}{4at} \leq 0,1$ рівнянням Дюпюї для сталого руху радіального потоку шляхом введення у формулу Дюпюї приведенного радіуса впливу R_n .

Теоретично, як бачимо з наведених раніше залежностей, при відкачці зі свердловин в умовах несталого режиму фільтрації й необмеженого водоносного горизонту мають місце такі явища:

- зниження рівня у свердловині необмежено збільшується в часі; при $t \rightarrow \infty$ зниження $S_0 \rightarrow \infty$ за формулою (17), тобто через той або інший проміжок часу рівень води у свердловині знизиться до свого граничного положення, після чого дебіт свердловини зменшуватиметься;
- вплив свердловини при відкачці з неї поширюється до «нескінченності», тобто радіус впливу безупинно збільшується (формула 16) і депресія має наблизитися до меж водоносного горизонту незалежно від відстані, на якій вони перебувають від пункту відкачки.

Однак практика експлуатації водозаборів показує, що в багатьох випадках, якщо в роботу не вводяться нові свердловини, рівні води в свердловинах через якийсь час практично стабілізуються. Радіуси впливу навіть дуже великих водозаборів артезіанських вод не перевищують 25 – 30 км, тобто в багато разів менше приведених радіусів, розрахованих за параметрами пружного режиму (200 – 400 км і більше).

Таким чином, має місце невідповідність теорії несталого руху підземних вод даним практики. Вона пов'язана з тим, що умови, покладені в основу виведення формули (1), часто не відображають реальні природні умови. Найбільш умовним є припущення, що горизонти, які залягають безпосередньо в покрівлі та подошві артезіанського горизонту, абсолютно непроникні.

Припущення про повну ізолюваність водоносного горизонту стосується тільки артезіанських горизонтів, що залягають на великих глибинах серед сильно ущільнених і глинистих горизонтів, які перебувають під великим тиском. Артезіанські води, використовувані для водопостачання, залягають на значно

менших глибинах, і горизонти, що розділяють їх, як правило не можна розглядати як «абсолютні» водотриви.

Слід зазначити, що значення приведенного радіуса впливу з відомим перебільшенням, при розрахунках експлуатаційних запасів призводить не до завищення, а до заниження запасів. З огляду на невисоку точність визначення гідрогеологічних параметрів, схематизацію граничних умов та інші причини, деякий «запас» у розрахунках, безумовно, виправданий.

Закінчуючи розгляд рівнянь нестационарної радіальної фільтрації для напірного горизонту, зупинимося на режимі руху підземних вод, якому відповідає формула $s = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2}$ (13), що відображає логарифмічну залежність між

зниженням рівня і часом. Умова, за якою $\frac{r^2}{4at} \leq 0,05 \dots 0,1$, означає не тільки можливість перетворення спочатку отриманої формули Тейса, вона відображає також настання періоду, коли несталый рух підземних вод змінюється у процесі відкачки квазістационарним режимом фільтрації.

Використовуючи рівняння для визначення знижень рівня у свердловині S_0 і в деякій точці на відстані r_1 від неї (зниження S_1), знайдемо різницю цих знижень $S_0 - S_1$. При сталому режимі фільтрації, використовуючи рівняння Дюпюї

$$S_0 = \frac{Q \lg \frac{R}{r_0}}{2,73km} \quad \text{і} \quad S_1 = \frac{Q \lg \frac{R}{r_1}}{2,73km} \quad \text{одержимо:}$$

$$S_0 - S_1 = \frac{Q \lg \frac{R}{r_0}}{2,73km} - \frac{Q \lg \frac{R}{r_1}}{2,73km} = \frac{Q}{2,73km} (\lg \frac{R}{r_0} - \lg \frac{R}{r_1}) = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{r_1}{r_0}. \quad (21)$$

Використовуючи рівняння

$$s = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2} \quad (14) \quad \text{і} \quad S_0 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r_0^2}, \quad (15),$$

отримаємо:

$$\begin{aligned} S_0 - S_1 &= \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r_0^2} - \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r_1^2} = \\ &= \frac{0,183Q}{km} (\lg \frac{2,25at}{r_0^2} - \lg \frac{2,25at}{r_1^2}) = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{r_1^2}{r_0^2} = \frac{0,366Q}{km} \lg \frac{r_1}{r_0}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким чином, різниця знижень у свердловині й у будь-якій точці, отримана в другому випадку, виявляється незалежною від часу та збігається з виразом, обумовленим рівнянням Дюпюї. Це означає, що при виконанні умови

$\frac{r^2}{4at} \leq 0,05 \dots 0,1$ режим зміни рівнів стає квазістаціонарним, коли рівні згодом знижуються, але їхній розподіл у кожний момент часу відповідає закономірностям стаціонарного режиму, тобто крива депресії має вигляд близький до логарифмічної кривої Дюпюї при усталеному русі, (градієнт потоку не залежить від часу t).

Час, після закінчення якого припустима заміна експонентної функції логарифмічною, отримав назву часу настання квазістаціонарного режиму $t_{\text{кв}}$.

З умови $\frac{r^2}{4at} \leq 0,05 \dots 0,1$ маємо:

$$t = t_{\text{кв}} \geq (2,5 \dots 5) \frac{r^2}{a} . \quad (23)$$

Зона, у межах якої діє логарифмічна залежність між зниженням і часом, називається зоною (областю) квазістаціонарного режиму (рис. 2). Радіус цієї зони $R_{\text{кв}}$ знаходиться з умови (7)

$$R_{\text{кв}} = (0,45 \dots 0,63) \sqrt{at} . \quad (24)$$

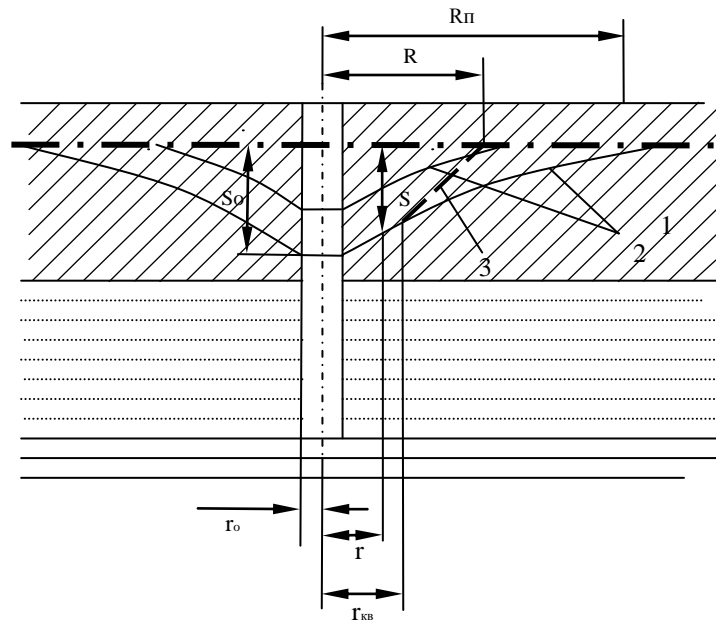


Рис. 2. Розвиток воронки депресії на два моменти часу при відкачці в необмеженому ізолюваному горизонті: 1 – статичний рівень, 2 – воронка депресії, що розвивається у часі; 3 – крива депресії за рівнянням Дюпюї

Деякі автори [1, 8], замінюючи експонентну функцію логарифмічною, виходять із похибки 1 – 5 % (а не 5 – 7 %) і записують вираз (7) у вигляді:

$$u = \frac{r^2}{4at} < 0,03 \dots 0,09.$$

У цьому випадку $t_{\text{кв.}} = (3...8) \frac{r^2}{a}$ і $R_{\text{кв.}} = (0,35...0,6) \sqrt{at}$.

Відмінною рисою зони квазістаціонарного режиму є однаковий темп зниження рівнів у всіх точках, розташованих у її межах. Покажемо це, визначивши зниження рівня за період часу $t_2 - t_1$ у точках M_1 і M_2 , розташованих на відстанях r_1 і r_2 від свердловини, з якої проводиться відкачка.

Знайдемо, використовуючи рівняння (13), зниження у точці M_1 на момент часу t_1 :

$$S_1 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at_1}{r_1^2}.$$

і t_2 :

$$S_2 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at_2}{r_1^2}.$$

Різниця знижень за період часу $t_2 - t_1$ становитиме:

$$S_2 - S_1 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{t_2}{t_1}.$$

Аналогічним шляхом визначимо зниження в точці M_2 на момент часу t_1 :

$$S_1 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at_1}{r_2^2}$$

і t_2 :

$$S_2 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at_2}{r_2^2}.$$

Звідси: $S_2 - S_1 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{t_2}{t_1}$.

Таким чином, за той самий інтервал часу $t_2 - t_1$ рівень у точках, розташованих на різній відстані від свердловини знизився на ту саму величину. Отже в зоні квазістаціонарного режиму криві депресії переміщуються в часі паралельно до самих себе.

Для самої свердловини, з якої проводиться відкачка $r = r_0$, де r_0 – радіус водоприймальної частини (фільтра) свердловини. Величина $\frac{r^2}{4at}$ дуже мала і вже через кілька хвилин відкачки становить мільйонні частки одиниці, тому тут уже із самого початку відкачки діє логарифмічний закон зниження рівня, що виражається

$$S_0 = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r_0^2}. \quad (14)$$

Зона, що розташовується поблизу свердловини, у якій порівняно швидко формується квазістаціонарний режим фільтрації, безупинно розширюється в часі і в разі підвищеної п'єзопровідності горизонту може досягати значних розмірів. При тривалих відкачках зона квазістаціонарного режиму руху підземних

вод, де дотримується умова $\frac{r^2}{4at} \leq 0,05 \dots 0,1$, охоплює практично всю область більш-менш помітного впливу відкачки, що розширює можливість використання при розрахунках наближених формул.

2.2. Свердловина в безнапірному горизонті

Для переходу від рівнянь Тейса для несталого руху підземних вод з напірною поверхнею до рівнянь несталого руху потоку підземних вод з вільною поверхнею можна замінити коефіцієнт п'єзопровідності a коефіцієнтом рівнепровідності a_b і скористатися співвідношенням:

$$2mS_0 = h_e^2 - h_c^2 = (2h_e - S_0)S_0.$$

Знайдемо з рівняння Тейса (1) при $S = S_0$ і $r = r_0$:

$$S_0 = \frac{Q}{4\pi km} \cdot \left[-E_i\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \right] \quad \text{або} \quad 2mS_0 = \frac{Q}{2\pi k} \left[-E_i\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \right], \quad (25)$$

рівняння для визначення дебіту ґрунтової свердловини, приймаючи

$$W(u) = -E_i(-u); \quad (2h_e - S_0)S_0 = \frac{Q}{2\pi k} \cdot W(u),$$

відкіля

$$Q = \frac{2\pi k(2h_e - S_0) \cdot S_0}{W(u)} \quad (26) \quad \text{або} \quad Q = \frac{2\pi k(h_e^2 - h_c^2)}{W(u)}. \quad (27)$$

Виразивши з рівняння (27) h_c :

$$h_c = \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} W(u)} \quad (28)$$

і з огляду на те, що $S_0 = h_e - h_c$, отримаємо вираження для визначення зниження рівня в центральній свердловині:

$$S_0 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} W(u)}. \quad (29)$$

Замінивши $W(u)$ у формулі (29) на $\ln \frac{2,25at}{r_0^2}$ маємо:

$$S_0 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} W(u)} = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{2,25at}{r_0^2}} = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q}{2 \cdot 3,14 \cdot k} 2,3 \lg \frac{2,25at}{r_0^2}}$$

тобто

$$S_0 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{0,366Q}{k} \lg \frac{2,25at}{r_0^2}}, \quad (30)$$

$$\text{або } S_0 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{0,732Q}{k} \lg \frac{R_{II}}{r_0}} \quad (31)$$

Замінивши в цій формулі r_0 на r , отримаємо рівняння для визначення зниження рівня в будь-якій точці безнапірного горизонту:

$$S = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{0,732Q}{k} \lg \frac{R_{II}}{r}}. \quad (32)$$

Формули (31) і (32) відповідно аналогічні за написанням отриманим раніше рівнянням Дюпюї для сталого режиму фільтрації [9] при заміні R на R_{II} :

$$S_0 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q \lg \frac{R}{r_0}}{1,36k}} \quad \text{і} \quad S_1 = h_e - \sqrt{h_e^2 - \frac{Q \lg \frac{R}{r_1}}{1,36k}}.$$

Загальний висновок, що випливає з вищевикладеного: введення у формули несталого руху напірних і безнапірних вод величини приведенного радіуса впливу є зручним розрахунковим прийомом, тому що це дозволяє використовувати при тривалій експлуатації водозабору (звичайно термін амортизації водозабору приймається рівним 25 – 30 рокам) для розрахунку несталого руху рівняння Дюпюї, виражаючи в них радіус впливу у функції часу (тобто вважаючи в них величиною радіуса впливу R приведений радіус впливу R_{II}).

3. Визначення коефіцієнта фільтрації та п'єзопровідності (рівнепровідності)

Методи визначення коефіцієнтів фільтрації та п'єзопровідності за даними дослідних відкачок при неусталеному русі знайшли широке застосування у нафтовій практиці як у нашій країні, так і за кордоном. Вони ґрунтуються на використанні формули (12) для визначення зниження рівня при роботі свердловини з постійним дебітом, широко застосовуються при гідрогеологічних дослідженнях. Як сказано вище, цю формулу застосовують при $\frac{r^2}{4at} < 0,1$.

Для умов напірних вод формула (12) перетвориться таким чином:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \cdot \ln \frac{2,25a}{r^2} + \frac{Q}{4\pi km} \ln t, \quad (33)$$

або, переходячи до десяткових логарифмів,

$$S = \frac{0,183Q}{km} \cdot \lg \frac{2,25a}{r^2} + \frac{0,183Q}{km} \lg t. \quad (34)$$

Якщо прийняти

$$\frac{0,183Q}{km} \cdot \lg \frac{2,25a}{r^2} = A, \quad (35)$$

а

$$\frac{0,183Q}{km} = C, \quad (36)$$

то формула (34) набуває вигляду:

$$S = A + C \lg t, \quad (37)$$

тобто залежність $S = f(\lg t)$ виражається рівнянням прямої лінії.

Якщо у напівлогарифмічному масштабі побудувати графік, на осі абсцис якого відкладати логарифми часу, на осі ординат зниження рівня, то отримаємо пряму з кутовим коефіцієнтом C та початковою ординатою A (рис. 3, а).

Коефіцієнт C визначається за формулою:

$$C = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}. \quad (38)$$

Узявши значення A безпосередньо з графіка (рис. 3, а) та визначивши C за формулою (38), можна розрахувати km та a за формулами:

$$km = \frac{0,183Q}{C}, \quad (39)$$

$$\lg a = 2 \lg r - 0,35 + \frac{A}{C}. \quad (40)$$

У формулі (40) величиною r потрібно вважати радіус свердловини, якщо визначення проводяться за центральною свердловиною. Якщо визначення проводяться за спостережною свердловиною, то r – відстань від центральної свердловини до спостережної.

Визначення коефіцієнтів фільтрації та рівнепровідності при випробуванні безнапірних водоносних горизонтів виконується так само як і для напірних, лише замість графіка $S = f(\lg t)$ будується графік $S(2H - S) = f(\lg t)$. Цей графік також виражається прямою лінією, рівняння якої має вигляд

$$S(2H - S) = A + C \lg t, \quad (41)$$

$$A = \frac{0,366Q}{k} \cdot \lg \frac{2,25a_y}{r^2}, \quad (42)$$

$$C = \frac{0,366Q}{k}. \quad (43)$$

Як і в напірних водах величина A визначається довжиною відрізка, що відсікається на осі ординат (рис. 3, б). Коефіцієнт C визначається за формулою

$$C = \frac{S_2(2H - S_2) - S_1(2H - S_1)}{\lg t_2 - \lg t_1}. \quad (44)$$

Коефіцієнти фільтрації та рівнепровідності можуть бути розраховані за відомих A і C за такими формулами:

$$k = \frac{0,366Q}{C}, \quad (45)$$

$$\lg a_y 2 \lg r - 0,35 + \frac{A}{C}. \quad (46)$$

Якщо зниження рівня (S) становить не більше 15 – 20 % від початкової потужності водоносного горизонту, то для безнапірних горизонтів можна визначити параметри, як для артезіанських, користуючись графіком $S = f(\lg t)$ із достатньою для практики точністю.

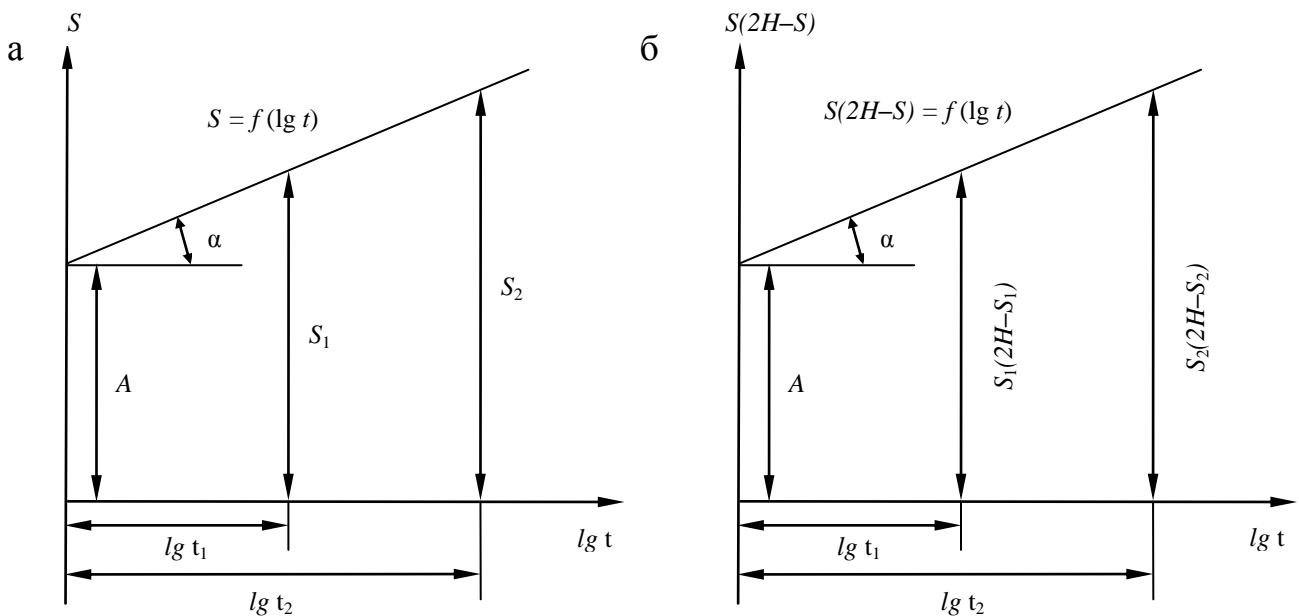


Рис. 3. Графік залежності знижень рівня від часу: а – в напірному водоносному горизонті, б – в безнапірному водоносному горизонті

4. Методичні рекомендації до розв'язання задач

Задача 1

Дано: дослідна відкачка проводилась із досконалої свердловини з напірного водоносного горизонту із постійним дебітом $Q = 1200 \text{ м}^3/\text{доб}$, радіус центральної свердловини $r_0 = 0,1\text{м}$, відстань до спостережної свердловини r становить 100 м. Результати замірів знижень рівня від часу наведені в табл. 4.1.

Знайти: коефіцієнти водопровідності та п'єзопровідності за даними дослідної відкачки.

Розв'язання задачі: будуємо графіки залежності $S_0 = f(\lg t)$ та $S_1 = f(\lg t)$, виражаючи S_0 та S_1 в метрах, t – в годинах (рис. 4). З графіка знімаємо значення A : за центральною свердловиною $A = 6,4$; за спостережною $A = 0,9$.

Таблиця 4.1

Час після початку відкачки t , год	Зниження рівня у центральній свердловині S_0 , м	Зниження рівня у спостережній свердловині S_1 , м	Час після початку відкачки t , год	Зниження рівня у центральній свердловині S_0 , м	Зниження рівня у спостережній свердловині S_1 , м
6	7,12	1,60	42	7,90	2,33
12	7,42	1,90	48	7,96	2,44
18	7,54	2,04	54	8,00	2,48
24	7,70	2,18	60	8,04	2,52
30	7,75	2,24	66	8,08	2,56
36	7,82	2,31	72	8,12	2,60

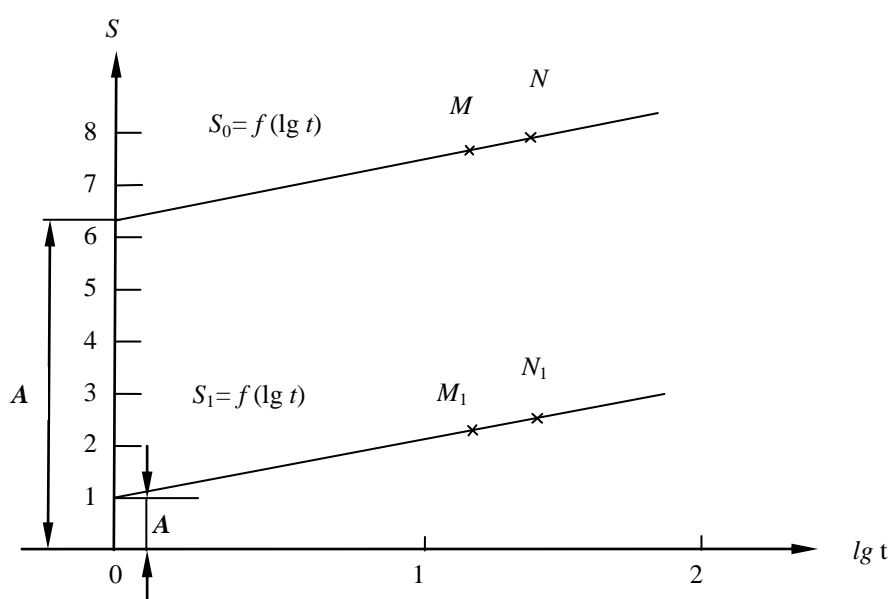


Рис. 4. Графік залежності знижень рівня від часу

Визначимо кутовий коефіцієнт C за формулою (38) за зниженнями та часом для двох точок графіка (M та N для центральної свердловини й M_1 та N_1 – для спостережної):

для центральної свердловини

$$C = \frac{7,7 - 7,5}{1,4 - 1,2} = 1;$$

для спостережної свердловини

$$C = \frac{2,2 - 2,0}{1,4 - 1,2} = 1.$$

Отже, і за центральною, і за спостережною свердловинами отримали однакові значення коефіцієнта C . За формулами (39) та (40) визначаємо коефіцієнти водопровідності та п'єзопровідності.

Коефіцієнт водопровідності

$$km = \frac{0,183 \cdot 1200}{1,0} = 220 \text{ м}^2/\text{доб.}$$

Коефіцієнт п'єзопровідності: для спостережної свердловини

$$\lg a = 2 \lg 100 - 0,35 + \frac{0,9}{1,0} = 4,55;$$

$$a = 3,58 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{год} = 8,5 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{доб.};$$

для центральної свердловини

$$\lg a = 2 \lg 0,1 - 0,35 + \frac{6,4}{1,0} = 4,05;$$

$$a = 1,12 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{год} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{доб.}$$

Визначення коефіцієнта п'єзопровідності за центральною свердловиною внаслідок можливого впливу привибійної зони менш надійне.

Розв'язати аналогічну задачу для таких варіантів:

Таблиця 4.2

Варіант №	Дебіт свердловини Q , м ³ /доб	Відстань до спостережної свердловини r , м	Варіант №	Дебіт свердловини Q , м ³ /доб	Відстань до спостережної свердловини r , м
1	800	30,0	14	0,1	750
2	900	35,0	15	0,1	850
3	1000	40,0	16	0,1	950
4	1100	45,0	17	0,1	1050
5	1200	50,0	18	0,1	1150
6	1300	55,0	19	0,1	1250
7	1400	60,0	20	0,1	1350
8	1500	65,0	21	0,1	1450
9	1600	70,0	22	0,1	1550
10	1700	75,0	23	0,1	1650
11	1800	80,0	24	0,1	1750
12	1900	85,0	25	0,1	1850
13	2000	90,0	26	0,1	1950

Задача 2

Дано: споруджується одиночний водозабір на водоносному горизонті, що приурочений до середньозернистих пісків. Середня потужність водоносного горизонту становить $m = 35$ м, коефіцієнт фільтрації $k_f = 8$ м/добу, коефіцієнт п'єзопровідності $a = 10^4$ м²/доб. Нижнім водотривом є глини, верхній водотриви – вапняки та мергелі. Водоносний горизонт напірний, відносний напір на покрівлю становить $H_{\text{відн.}} = 25$ м. Свердловина споруджена фільтраційною колоною радіусом $r = 0,1$ м.

Знайти: положення рівня води в свердловині при дебіті $Q = 1000$ м³/доб та максимально допустимий дебіт.

Розв'язання задачі. як розрахункову схему для даного випадку обираємо схему необмеженого однорідного ізольованого водоносного горизонту. Приймаємо розрахункові гідрогеологічні параметри. Водопровідність:

$$T = km = 8 \cdot 35 = 280 \text{ м}^2/\text{доб},$$

$$t = t_p = 10^4 \text{ діб}.$$

Розрахуємо зниження у свердловині за формулою (1). Визначимо границі застосовності формули за виразом (7):

$$\frac{r^2}{4at} = \frac{0,1^2}{4 \cdot 10^4 \cdot 10^4} = 2,5 \cdot 10^{-11},$$

оскільки отримане за розрахунками число менше ніж $0,05 \dots 0,1$, то розв'язання виконується за формулою (12):

$$S = \frac{1000}{4 \cdot 3,14 \cdot 280} \ln \frac{2,25 \cdot 10^4 \cdot 10^4}{0,1^2} = 6,67 \text{ м}.$$

Визначимо величину максимально припустимого дебіту, який можна отримати на водозабір. Скористаємося тією ж формулою (12), оскільки $\frac{r^2}{4at} \leq 0,1$, де $0,1$ – границя застосування для формули (12), з якої виразимо дебіт:

$$Q = \frac{4\pi TS}{\ln \frac{2,25at}{r^2}} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 280 \cdot 25}{\ln \left(\frac{2,25 \cdot 10^4 \cdot 10^4}{0,01} \right)} = 3689 \text{ м}^3/\text{доб}.$$

Розв'язати аналогічну задачу для варіантів з табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Варіант №	Потужність водоносного горизонту t , м	Коефіцієнт фільтрації k_f , м/доб	Коефіцієнт п'єзопровідності a , м ² /доб	Дебіт водозабору Q , м ³ /доб
1	40	8,0	10 ⁴	2000
2	45	7,0	10 ⁴	3000
3	50	8,5	10 ⁴	4000
4	55	10,0	10 ⁴	1500
5	60	5,0	10 ⁴	3500
6	40	8,0	10 ⁴	3000
7	45	7,0	10 ⁴	4000
8	50	8,5	10 ⁴	1500
9	55	10,0	10 ⁴	3500
10	60	5,0	10 ⁴	2000
11	35	6,5	10 ⁴	1700
12	25	7,0	10 ⁴	2200
13	43	8,0	10 ⁴	3100
14	51	9,0	10 ⁴	2000
15	58	8,5	10 ⁴	3000
16	37	6,0	10 ⁴	2500
17	44	7,5	10 ⁴	3500
18	52	9,5	10 ⁴	3800
19	46	8,0	10 ⁴	1800
20	54	7,0	10 ⁴	2100
21	39	8,5	10 ⁴	3400
22	47	9,0	10 ⁴	2400
23	53	5,5	10 ⁴	1700
24	37	6,0	10 ⁴	3000
25	59	8,0	10 ⁴	2100
26	42	7,5	10 ⁴	3200

Список літератури

1. Біндеман, Н.Н. Оцінка експлуатаційних запасів підземних вод [Текст] / Н.Н. Біндеман. – М.: Держгеоліздат, 1963. – 204 с.
2. Біндеман, Н.Н. Оцінка експлуатаційних запасів підземних вод [Текст] / Н.Н. Біндеман, Л.С. Язвін. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
3. Бочевер, Ф.М. Розрахунки експлуатаційних запасів підземних вод [Текст] / Ф.М. Бочевер. – М.: Недра, 1968. – 325 с.
4. Дробноход, Н.І. Оцінка запасів підземних вод [Текст] / Н.І. Дробноход, Л.С. Язвін. – Київ: Вища школа, 1982. – 301 с.
5. Жернов, І.Є. Динаміка підземних вод [Текст] / І.Є.Жернов. – К.: Вища школа, 1982. – 324 с
6. Бочевер, Ф.М. Основи гідрогеологічних розрахунків [Текст] / Ф.М. Бочевер, І.В. Гармонов. – М.: Недра, 1969. – 357 с.
7. Проектування водозаборів підземних вод [Текст] / За ред. Ф.М. Бочевера. – М.: Стройіздат, 1976. – 292 с.
8. Шестаков, В.М. Динаміка підземних вод [Текст] / В.М.Шестаков. – М.: МГУ, 1979. – 368 с.
9. Розрахунок одиночних досконалих свердловин при стаціонарному режимі в умовах кругового контуру живлення. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Динаміка підземних вод» [Текст] / О.О. Федоренко, Є.А. Шерстюк. Д.: НГУ, 2012, – 24 с.

Таблиця функцій $W(u)$

u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)	u	W(u)
0,001	6,332	0,11	1,737	0,39	0,719	0,67	0,396	0,95	0,239
0,002	5,639	0,12	1,660	0,40	0,702	0,68	0,388	0,96	0,235
0,003	5,235	0,13	1,589	0,41	0,686	0,69	0,381	0,97	0,231
0,004	4,948	0,14	1,524	0,42	0,670	0,70	0,374	0,98	0,227
0,005	4,726	0,15	1,465	0,43	0,640	0,71	0,367	0,99	0,223
0,006	4,544	0,16	1,409	0,44	0,655	0,72	0,360	1,00	0,219
0,007	4,392	0,17	1,358	0,45	0,625	0,73	0,353	1,1	0,186
0,008	4,259	0,18	1,310	0,46	0,611	0,74	0,347	1,2	0,158
0,009	4,142	0,19	1,265	0,47	0,598	0,75	0,340	1,3	0,135
0,01	4,038	0,20	1,223	0,48	0,585	0,76	0,334	1,4	0,116
0,015	3,637	0,21	1,183	0,49	0,572	0,77	0,328	1,5	0,100
0,02	3,355	0,22	1,145	0,50	0,560	0,78	0,322	1,6	0,086
0,025	3,137	0,23	1,110	0,51	0,548	0,79	0,316	1,7	0,075
0,03	2,959	0,24	1,076	0,52	0,536	0,80	0,311	1,8	0,065
0,035	2,810	0,25	1,044	0,53	0,525	0,81	0,305	1,9	0,056
0,04	2,681	0,26	1,014	0,54	0,514	0,82	0,300	2,0	0,049
0,045	2,568	0,27	0,985	0,55	0,503	0,83	0,294	2,5	0,025
0,05	2,468	0,28	0,957	0,56	0,493	0,84	0,289	3,0	0,013
0,055	2,378	0,29	0,931	0,57	0,483	0,85	0,284	3,5	0,007
0,06	2,295	0,30	0,906	0,58	0,473	0,86	0,279	4,0	0,0038
0,065	2,220	0,31	0,882	0,59	0,464	0,87	0,274	4,5	0,0021
0,07	2,151	0,32	0,858	0,60	0,454	0,88	0,269	5,0	0,001
0,075	2,087	0,33	0,836	0,61	0,445	0,89	0,265	5,5	$6,4 \times 10^{-4}$
0,08	2,027	0,34	0,815	0,62	0,437	0,90	0,260	6,0	$3,6 \times 10^{-4}$
0,085	1,971	0,35	0,794	0,63	0,428	0,91	0,256		
0,09	1,919	0,36	0,775	0,64	0,420	0,92	0,251		
0,095	1,870	0,37	0,755	0,65	0,412	0,93	0,247		
0,10	1,823	0,38	0,737	0,66	0,404	0,94	0,243		

**Федоренко Олена Олександрівна
Шерстюк Євгенія Анатоліївна**

**ОДИНОЧНІ ДОСКОНАЛІ СВЕРДЛОВИНИ
ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ В УМОВАХ КРУГОВОГО КОНТУРУ
ЖИВЛЕННЯ. ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ
Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни
«Динаміка підземних вод»**

для студентів напряму підготовки 6.040103 Геологія

Редактор Т.С. Меркулова

Підписано до друку 17.01.12. Формат 30×42/4.
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 1,5.
Обл.-вид. арк. 1,5. Тираж 50 прим. Зам. №

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.