

УДК 556.343

О.Я. ОЛІЙНИК, доктор технічних наук
А.М. ТУГАЙ, доктор технічних наук
Київський національний університет будівництва і архітектури
Є.О. ОЛІЙНИК, провідний інженер
Інститут гідромеханіки НАНУ

РОЗРАХУНОК ПІДРУСЛОВИХ ПРОМЕНЕВИХ ВОДОЗАБОРІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ОПОРІВ

Представлено математичне обґрунтування розрахунку фільтрів-променів підруслового променевого водозабору при одно- і двошаровій водоносній товщі із використанням методу фільтраційних опорів. Наводяться приклади розрахунку трьох- і чотирьохпроменевих підруслових водозаборів.

Ключові слова: променевий водозабір; фільтри-промені; водоносна товща; фільтраційний опір.

Представлено математическое обоснование расчета фильтров-лучей подруслового лучевого водозабора при одно- и двухслойной водоносной толще с использованием метода фильтрационных сопротивлений. Дан пример расчета трех- и четырехлучевых подрусловых водозаборов.

Ключевые слова: лучевой водозабор; фильтры-лучи; водоносная толща; фильтрационные сопротивления.

Mathematical calculation for filter rays of underflow radial intake with one- and two-layers thickness for aquifer using method of filtration resistances. The example of calculation for three-layers underflow intakes is shown.

Key words: radial intake; filter rays; water-bearing layer; filter resistance.

Розрахунки променевих водозаборів завжди непрості, трудомісткі і незавжди достовірні. Обумовлено це складними, іноді надскладними, природними умовами, їх влаштуванням, розташуванням фільтрів-променів, зокрема, як у товщі водоносного шару, так і відносно один до одного. Цими ж причинами зумовлена наявність великої кількості досить наближених підходів і методів їх розрахунку.

Більш надійний і нескладний спосіб, на наш погляд, є відомий метод фільтраційних опорів, який широко використовується при фільтраційних

розрахунках підземних водозаборів і дренажів, які діють в різноманітних гідрогеологічних умовах [1,2,3,4,5,6] .

Основні принципи цього методу широко освітлені в спеціальній літературі і полягають в приведенні досить складних фільтраційних потоків до більш простих – трьохмірних у двомірні, двомірних у одномірні. У випадках досить складних фільтраційних потоків, при цьому методі можна виділити дві межі характерних зон потоку, а саме локальні зони різкозмінної фільтрації і значні зони повільнозмінного потоку. Зони різкозмінної фільтрації мають місце переважно поблизу різних недосконалих границь (каналів, водоймищ, водозаборів, дренажів і т.д.) і досить вдало враховують складний просторовий фільтраційний приток до них.

В цих випадках спостерігається збільшення опору потоку, тобто падіння рівня (напору) може бути враховано за допомогою методу фільтраційних опорів шляхом зміни недосконалих границь досконалими, еквівалентними за фільтраційною витратою і картині фільтрації на деякій віддалі від границь, яка розглядається. При такій заміні зони різкозмінної фільтрації виключають із розгляду. Ефект від дії самих різноманітних по своїх геометричних особливостях і конструкціях недосконалих водозаборів і дренажів можна замінити практично еквівалентними по дії, простими по формі і конструкції досконалими водозаборами і дренажами, які повністю розкривають (пронизують) водоносну товщу. При цьому вже на відстані декількох товщин водоносного пласта утворюється зона повільнозмінного планового потоку з таким же розподілом і зменшеннями напорів в ньому, як і у випадку досконалих меж. Ця обставина суттєво полегшує розрахунки водозаборів і дренажів. Тому використання методу фільтраційних опорів особливо ефективно у випадку розрахунку променевих недосконалих водозаборів і дренажів.

Виходячи із сказаного, розрахункова формула продуктивності (витрати) кожного i -го променя-фільтра довжиною l_i може бути розрахована по залежності виду [3]:

$$Q_i = \frac{2\pi k l_i S_i}{\bar{\Phi}_i}, \quad (1)$$

де $S_i = H_v - H_{\Phi_i}$ – діючий напір на фільтрі-промені (зниження напору); H_v – напір (рівень) у водоймі; H_{Φ_i} – напір (рівень) в i -му фільтрі-промені; $\bar{\Phi}_i$ – фільтраційний опір i -го фільтра променя променевого водозабора (дренажу), який складається із суми двох опорів: основного $\bar{\Phi}_o$, і додаткового $\Delta\bar{\Phi}_d$, тобто

$$\bar{\Phi}_i = \bar{\Phi}_o + \Delta\bar{\Phi}_d, \quad (2)$$

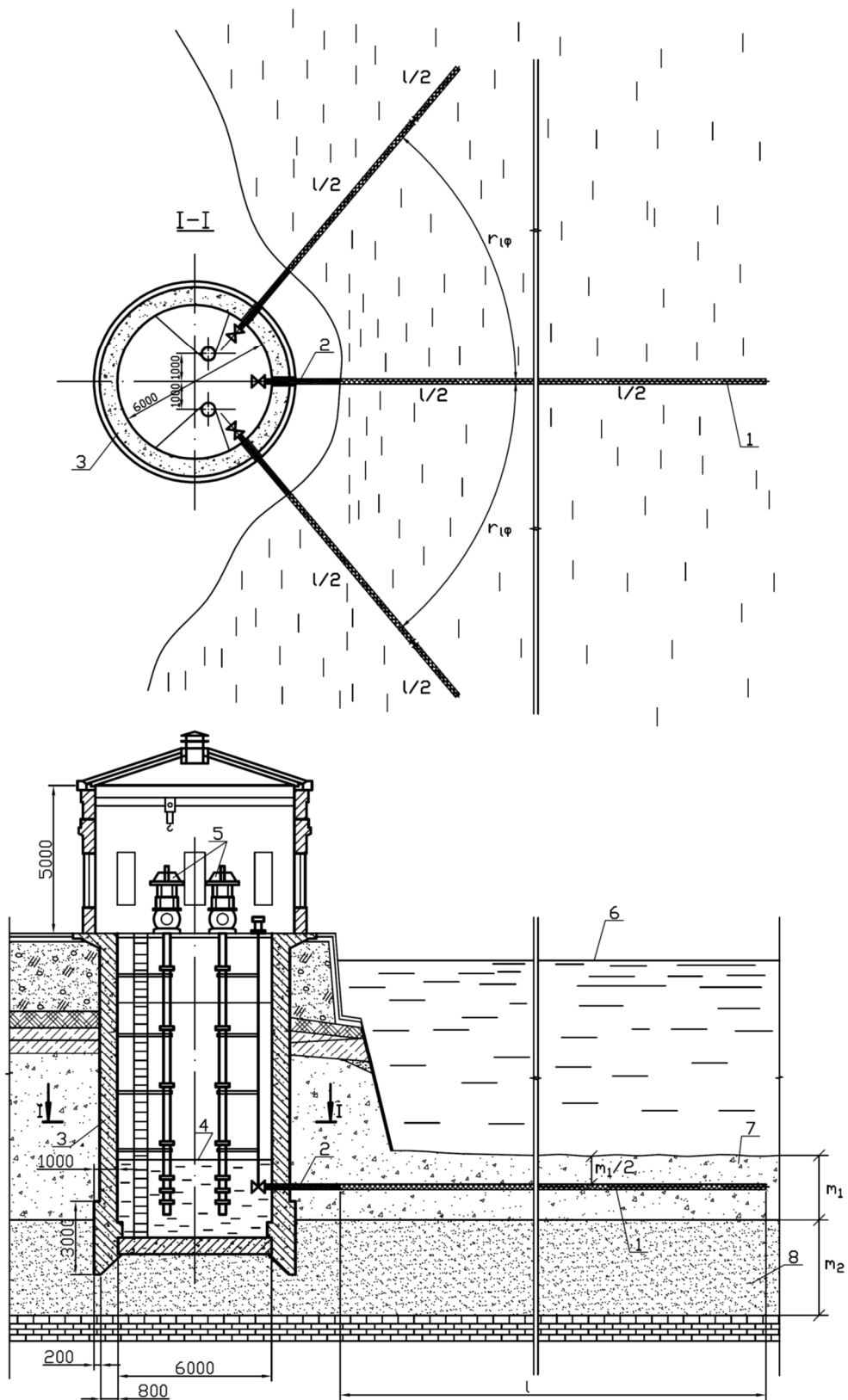


Рис.1. Підрусловий трьох-променевий водозабір: а) план; б) розріз.

- 1 – горизонтальні фільтри-промені; 2 – глуха труба;
 3 – водозбірний колодязь; 4 – рівень води у колодязі; 5 – водопідйомники;
 6 – рівень води у водоймищі (річці); 7 – середньозернисті піски; 8 – супісь

де $\bar{\Phi}_o$ – основний опір на гідродинамічну недосконалість i -го фільтра-променя, $\Delta\bar{\Phi}_d$ – додатковий опір, який враховує взаємний вплив суміжних недосконалих фільтрів-променів при їх близькому розташуванні ($l_\phi < 2m$).

У випадку однорідної водоносної товщі опір $\bar{\Phi}$ і його складові в умовах підруслового водозабору (дренажу) будуть

$$\bar{\Phi}_i = \bar{f}_i, \quad \bar{\Phi}_o = \bar{f}_o, \quad \Delta\bar{\Phi}_d = \Delta\bar{f}_d, \quad \bar{f}_i = \bar{f}_o + \Delta\bar{f}_o. \quad (3)$$

Нагадаємо, що в загальному випадку в умовах берегового променевого водозабору опір Φ і його складові Φ_o і $\Delta\Phi$ визначаються за формулами [1]:

$$\Phi = mf, \quad \Phi_o = mf_o, \quad \Delta\Phi_d = m\Delta f, \quad (4)$$

тобто з врахуванням безпосередньо потужності водоносної товщі, де f , f_o , Δf – відповідні безрозмірні опори, які визначаються використанням загального рівняння фільтрації до точкового джерела з урахуванням потужності пласта m і розташованого фільтра-променя під покрівлею водоносного пласта ϕ .

$$\phi = \frac{q}{\pi m} \sum_{n=0}^{\infty} \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2m} \sin \frac{(2n+1)\pi \alpha}{2m} K_0 \left[\frac{(2n+1)\pi r}{2m} \right]. \quad (5)$$

Не приводячи тут математичні викладки і аналіз одержаних рішень, які зокрема наведені в роботі [1] для схем одно- і двопреневого дренажу, приведемо остаточні вирази для визначення опорів \bar{f}_o і $\Delta\bar{f}$ у випадку довгих і коротких фільтрів-променів.

Для довгих дрен ($l_\phi > 2m$) при їх розташуванні на глибині α під дном водойми (русла річки) маємо

$$\bar{f}_o = \ln \left(\frac{4m}{\pi r_\phi} \operatorname{tg} \frac{\pi \alpha}{2m} \right) \quad (6)$$

або

$$\bar{f}_o = 2 \ln \frac{4m \cos \frac{\pi b}{2m}}{\pi \sqrt{2rg(b + 0,5r_\phi)}}, \quad (7)$$

де $b = m - \alpha$ – відстань від підшви пласта, r_ϕ – розрахунковий радіус фільтр-променя.

При $\alpha = m - r_\phi$ в формулі (6) чи при $b = 0$ в формулі (7), тобто для фільтрів-променів, які лежать на водоупорі, маємо

$$\bar{f}_o = 2 \ln \frac{4m}{\pi r_\phi}, \quad (8)$$

а для фільтрів, розташованих посередині пласта ($\alpha = 0,5m$) маємо

$$\bar{f}_0 = \ln \frac{4m}{\pi r_\phi} \quad (9)$$

Для визначення опорів $\Delta \bar{f}$, які враховуються тільки при $r_{l\phi} \leq 2m$, пропонується формула

$$\Delta \bar{f} = \Delta f(m^0) - \Delta f(m), \quad (10)$$

де опір Δf (3) приймається за формулою

$$\Delta f = 2 \sum_{k=2}^N f_k(r_{l\phi}, b), \quad (11)$$

в якій опори $f_k(m^0)$ і $f_k(m)$ приймаються із графіка рис.2, відповідно, при $m^0 = 2m$ і m ; $r_{l\phi}$ – відстань від середини фільтра-променя, який розглядається; $k = 1$, до середини сусідніх фільтрів-променів $k = 2, 3, \dots, N$.

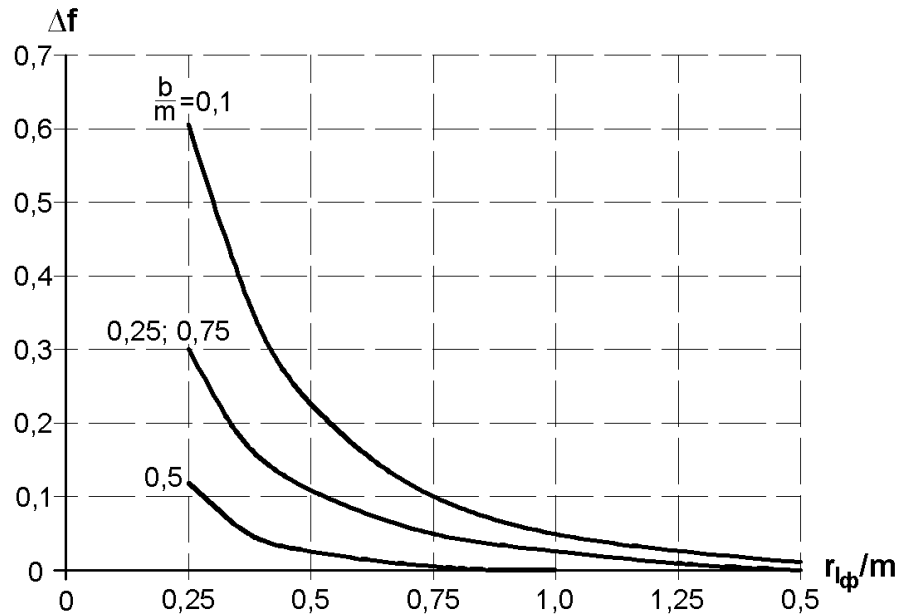


Рис.2. Графік залежності $\Delta f = f(r_{l\phi}, b)$.

Для коротких фільтрів-променів ($l < 2m$) опори приймаються за формулою

$$\bar{f}_0 = \frac{2\pi l}{m} [f_s(m^0) - f_s(m)], \quad (12)$$

де опір f_s знаходиться по графіку рис.3 при $m^0 = 2m$ і m і r_0 .

Додатковий опір Δf вираховується по формулі

$$\Delta \bar{f} = 2\pi \frac{l}{m} [\Delta f_s(m^0) - \Delta f_s(m)], \quad (13)$$

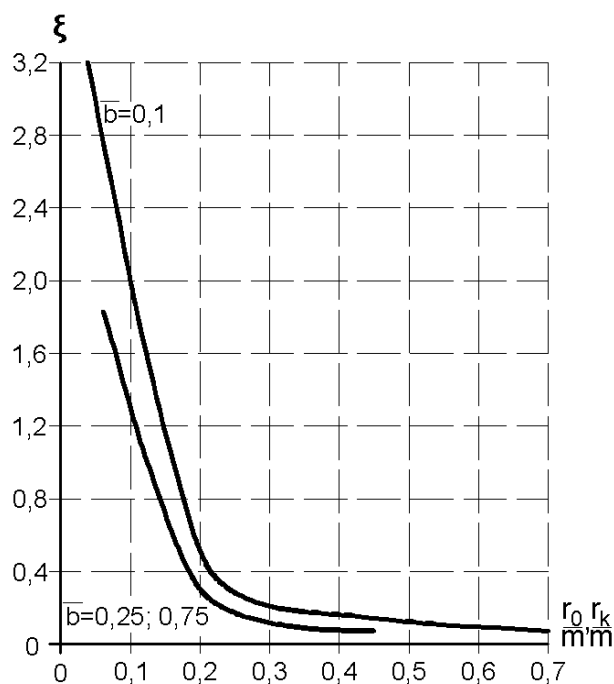
в якій опір Δf_s приймається

$$\Delta f_s = \sum_{k=2}^N f_{sk}, \quad (14)$$

в якій опори $f_s(m^0)$ і $f_s(m)$ із рис.3, відповідно, при $m^0 = 2m$ і m для

відношення $\frac{r_k}{m_0}$ і $\frac{r_k}{m}$.

На графіку (рис.2) r_0 – радіус сферичного фільтра, який приймається за формулою:



$$f_s = f\left(\frac{r_0}{m}, \frac{b}{m}\right)$$

Рис.3. Графік залежності

$$r_0 = \frac{l}{2 \ln \frac{l}{1,356r_\phi}}, \quad (15)$$

а опір $f_s = \frac{\xi m}{Sl}$, де $S = 1,356r_\phi$.

Для підруслового променевого водозабору (дренажу), розташованого у верхньому шарі двошарової водоносної товщі по глибині, розрахунок виконується також по формулі (1), в якій приймається коефіцієнт фільтрації $k = k_1$, а опір $\bar{\Phi}$ буде залежати від параметрів цієї товщі, а саме

$$\bar{\Phi} = \frac{(1+\lambda_1)\lambda_1 \bar{f}_1}{2} + \frac{(\lambda_1-1)\lambda_1 \bar{f}_1^*}{2} - (\lambda_1^2 - 1)\bar{f}, \quad (16)$$

де $\lambda_1 = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$ опори \bar{f}_1, \bar{f} визначаються по формулі (2), відповідно, при m_1 і

$m = m_1 + m_2$, а опір \bar{f}_1^* наближено при $l > 2m$ і $r_{l\phi} > m$ по формулі

$$\bar{f}_1^* \approx \bar{f}_{0_1}^* = \ln \frac{2m_1}{\pi r_\phi} \sin \frac{\pi \alpha}{m_1} \quad (17)$$

Для випадку $\alpha \leq 0,5m_1$, тобто, при розташуванні фільтра десь в середній частині верхнього шару опір f^* як для довгих, так і коротких дрен приймаються

$$f_1^* = 0,5\bar{f}_1(m^*) \quad (18)$$

де $m^* = 0,5m_1$, тобто, вирахування опорів \bar{f}_1 і його складові \bar{f}_{0_1} і $\Delta\bar{f}_1$ проводяться по попереднім формулам, а для потужності $m^* = 0,5m_1$.

Для підруслового променевого водозабору (дренажу), розташованому у нижньому шарі двошарової водоносної товщі на глибині b від її підшови розрахунок виконується також по формулі (6), в якій приймається $k = k_2$, а опір $\bar{\Phi}$ буде визначатись по залежності

$$\bar{\Phi} = \frac{(1+\lambda_2)\lambda_2}{2} \bar{f}_2 + \frac{(\lambda_2-1)\lambda_2}{2} \bar{f}_2^* - (\lambda_2^2-1)\bar{f} \quad (19)$$

де $\lambda_2 = \frac{k_2 - k_1}{k_1 + k_2}$, а опори \bar{f}_2 , \bar{f} визначаються по формулі (6) при m_2 і $m = m_1 + m_2$, а опір \bar{f}_2^* наближено при $l > 2m$ і $r_{i\phi} > m$ по формулі (7).

Приклад розрахунку.

1. Визначити витрату середнього фільтра-променя $i = 2$ трьохпроменевого підруслового водозабору (рис.1), який здійснює водозабір із верхньої двошарової водоносної товщі з параметрами $m_1 = 5$ м, $m_2 = 10$ м, $k_1 = 5$ м/доб, $k_2 = 1$ м/доб.

Фільтри-промені розташовані на глибині $\alpha = 2,5$ м від поверхні землі, розрахунковий радіус фільтра $r_i = 0,2$ м, їх довжина $l = 30$ м, напір на дренах $S = 4$ м, віддаль між серединами дрен $r_{i\phi} = 10$.

Витрату дрени визначаємо по формулі (1) при $k = k_1 = 5$ м/доба, в якій опір вираховуємо по формулі (12). В цій формулі опори \bar{f}_1 , \bar{f} і f_1^* враховуємо по формулам (6) і (17): $\bar{f}_1^* = 3,40$; $\bar{f}_2^* = 3,24$; $f_1^* = 2,77$.

Результати розрахунку додаткового опорю Δf_i , яке в даному випадку для середньої фільтра-променя вираховується по формулі

$$a) \quad \Delta\bar{f}_i = 2f_{ni}(r_k, b, m^0) - 2f_{ni}(r_k, b, m), \quad b = m - \alpha$$

зводимо в таблицю 1.

Як і передбачалось, у випадку $l > 2m$ додаткові опори $\Delta \bar{f}$ будуть незначні. Таким чином, розрахункові опори будуть складати $\bar{f}_1 = 3,51$; $\bar{f} = 3,32$; $f_1^* = 2,77$. Тоді опір $\bar{\Phi}$ при $\lambda_1 = \frac{5-1}{5+1} = 0,67$ буде складати (16):

Результати розрахунку опорів $\Delta \bar{f}_i$

m_i	m_i^0	$\frac{\alpha}{m_i}$	$\frac{\alpha}{m_{0i}}$	$\frac{r_k}{m_i}$	$\frac{r_k}{m_{0i}}$	$\Delta \bar{f}_i$
2,5	5	0	0	-	-	0
5,0	10	0,5	0,25	2,00	1,00	0,05
15	30	0,830	0,45	0,67	0,33	0,08

$$\bar{\Phi} = \frac{1,67 \cdot 0,67}{2} 3,51 + \frac{-0,33 \cdot 0,67}{2} 2,77 - (0,67^2 - 1) \cdot 3,32 = 3,49$$

Таким чином, витрата середньої дрени-променя буде

$$Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 30 \cdot 4}{3,42} = 1078,7 \text{ м}^3/\text{доб.}$$

Враховуючи, що додатковий опір $\Delta \bar{f}_i$ в порівнянні з основними опорами \bar{f}_0 складає незначну величину, то витрати у 1-й і 3-й фільтрах-променях будуть майже не відрізнятися від витрати 2-го (середнього) фільтра-променя. Таким чином витрата трьохпроменевого водозабору в даному випадку буде складати

$$Q = 3 \cdot 1078,7 = 3236,1 \text{ м}^3/\text{доб.}$$

2. Визначити витрату 2-го фільтра-променя 4-х променевого підруслового водозабору, який забирає воду із однорідної водоносної товщі з параметрами $k = 10$ м/доб, $m = 15$ м. Фільтри-промені розташовані на глибині $a = 5$ м від поверхні землі, розрахунковий радіус фільтра-променя $r_\phi = 0,25$ м, їх довжина $l_\phi = 7,5$ м, напір на фільтрах $S_\phi = 7,5$ м, відстань між серединами фільтрів-променів $r_\phi = 5$ м. розрахунок витрати 2-го фільтра-променя виконується за формулою (1), спочатку вираховавши опір $\bar{\Phi} = \bar{f}$ і його складові \bar{f}_i і $\Delta \bar{f}$ (6,7). Для розрахунку опору \bar{f}_i спочатку по формулі (15) знаходимо радіус сфери r_0

$$r_0 = \frac{7,5}{2 \ln \frac{7,5}{1,356 \cdot 0,25}} = 1,21 \text{ м.}$$

Опори $f_{s^*}(m^0)$ і $f_{s^*}(m)$ приймаємо по графіку рис.2, відповідно, при $\frac{r_0}{m^0} = 0,04$; $\frac{l}{m^0} = 0,83$ і $\frac{r_0}{m} = 0,08$; $\frac{l}{m} = 0,67$; $f_{s^*}(m^0) = 2,2$ і $f_{s^*}(m) = 0,7$.
 Додаткові опори $\Delta f_s(m^0)$ і $\Delta f_s(m)$ в формулі (14) будуть

$$\Delta f_s(m^0) = f_{s1}(m^0) + f_{s3}(m^0) + f_{s4}(m^0) = 0,4 + 0,4 + 0,04 = 0,84,$$

$$\Delta f_s(m) = f_{s1}(m) + f_{s3}(m) + f_{s4}(m) = 0,4 + 0,0 + 0,01 = 0,09,$$

де опори $f_s(m^0)$ і $f_s(m)$ приймаються із графіку рис.2 відповідно при $\frac{r_1}{m^0} = 0,17$, $\frac{r_3}{m^0} = 0,17$, $\frac{r_4}{m^0} = 0,83$ для знання $\frac{b}{m^0} = 0,83$ і $\frac{r_1}{m} = 0,33$, $\frac{r_3}{m} = 0,33$, $\frac{r_4}{m} = 0,67$ для значень $\frac{b}{m} = 0,67$. Тоді опори \bar{f}_s , $\Delta \bar{f}$, \bar{f} будуть

$$\bar{f}_s = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5}{15} (2,2 - 0,7) = 4,71,$$

$$\Delta \bar{f} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5}{15} (0,84 - 0,09) = 2,36,$$

$$\bar{f} = \bar{f}_s + \Delta \bar{f} = 4,71 + 2,36 = 7,07.$$

Тоді витрата Q_2 буде

$$Q_2 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 7,5 \cdot 7,5}{7,07} = 500 \text{ м}^3/\text{доб.}$$

Таким чином середні фільтри-промені 2 і 3 мають витрати $Q_2 = Q_3 = 500$ м³/доба. Крайні фільтри-промені 1 і 4 згідно з розрахунками мають витрати $Q_1 = Q_4 = 595$ м³/доба. Збільшення витрати крайніх фільтрів-променів буде за рахунок зменшення додаткового опору $\Delta \bar{f}$ ($\Delta \bar{f} = 1,23$).

Список літератури

1. Олейник А.Я. Расчет дополнительных фильтрационных сопротивлений горизонтальных дрен, несовершенных дрен и несовершенных скважин в двухслойном пласте // Труды координац.совещаний по гидротехнике, J1. – "Энергия", вып.35. – С.87-98.

2. Олейник А.Я. Фильтрационные расчеты вертикального дренажа.– К.: Наукова думка, 1978.– 202 с.

3. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа.– К.: Наукова думка, 1981.– 283 с.

4. Олейник А.Я., Поляков В.Л. Дренаж переувлажненных земель. К.: Наукова думка, 1987. – 280 с.

5. Олейник Е.А. Численный расчет пространственной задачи фильтрации к лучевому дренажу // Сб. научн.трудов «Гидромеханика», вып.60. – 1989. – С.45-49.

6. Основы гидрогеологических расчетов./ Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. – М.: Недра, 1969. – 386 с.