

УДК 628.1

Тугай А.М., д.т.н., професор (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ), Хомуцька Т.П., к.т.н., ст.наук.сп. (Інститут гідротехніки і меліорації НААНУ, м. Київ)

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРДЛОВИНИ НА ПОКАЗНИКИ ЇЇ РОБОТИ

Досліджено вплив зміни гідравлічних характеристик свердловин, споруджених в напірних та безнапірних водоносних пластах, на показники їхньої роботи.

The article explores the impact of changes of hydraulic characteristics of wells built in pressure and nonpressure water-bearing stratum on parameters of work.

У водозабірних свердловинах розрізняють два види недосконалості свердловин, що впливають на їхні фільтраційні опори: за ступенем і за характером розкриття водоносного пласта [1-3]

$$\xi = \xi_1 + \xi_2, \quad (1)$$

де ξ_1 і ξ_2 – відповідно опори недосконалості свердловин за ступенем і характером розкриття пласта.

Опір ξ_1 залежить від довжини та розташування фільтра у водоносному пласті, проникності та потужності пласта і визначається на основі гідрогеологічних розрахунків. Опір ξ_2 залежить від конструкції фільтра, стану його кольматації в процесі експлуатації свердловини та фільтраційної деформації у присвердловинній зоні (кольматаж і винос частинок ґрунту, тобто суфозія) [2, 4-7].

У роботах [2, 3] відмічається, що порушення хімічної рівноваги відбувається біля свердловини і концентрація кольматуючих часток в підземних водах приймається пропорційно зниженню рівня води, що утворилося внаслідок відкачування води.

Отже, при русі води з водоносного пласта у водозабірну свердловину виникають втрати напору, які визначаються за формулами:

а) при заборі води з напірних водоносних пластів:

$$\Sigma h_{\phi} = \frac{Q(\ln R / r + \xi_1 + \xi_2)}{6,28K_{\phi}m} = \Delta h_n + \Delta h_{\phi}, \quad \text{м}, \quad (2)$$

де m і K_{ϕ} – відповідно потужність, м, і коефіцієнт фільтрації, м/добу, водоносного пласта; Δh_n і Δh_{ϕ} – втрати напору відповідно у водоносному пласті (зоні депресійної воронки радіусом R) та фільтрі свердловини радіусом r .

$$\Delta h_{\Pi} = \frac{Q \ln R / r}{6,28K_{\phi} m}, \text{ м}; \quad (3)$$

$$\Delta h_{\phi} = \frac{Q (\xi_1 + \xi_2)}{6,28K_{\phi} m} = Q\Psi, \text{ м}, \quad (4)$$

де Ψ - коефіцієнт гідравлічного опору фільтра:

$$\Psi = \frac{\xi_1 + \xi_2}{6,28K_{\phi} m}, \text{ доба/м}^2; \quad (5)$$

б) при заборі води із безнапірних водоносних пластів:

$$\Sigma h_{\phi} = \frac{Q(\ln R / r + \xi_1 + \xi_2)}{3,14K_{\phi} (H + h)} = \Delta h_{\Pi} + \Delta h_{\phi}, \text{ м}, \quad (6)$$

$$\Delta h_{\Pi} = \frac{Q \ln R / r}{3,14K_{\phi} (H + h)}, \text{ м}; \quad (7)$$

$$\Delta h_{\phi} = \frac{Q (\xi_1 + \xi_2)}{3,14K_{\phi} (H + h)} = Q\Psi, \text{ м}, \quad (8)$$

$$\Psi = \frac{\xi_1 + \xi_2}{3,14K_{\phi} (H + h)}, \text{ доба/м}^2. \quad (9)$$

У цих формулах: H – глибина статичного рівня води у водоносному пласті, м; h – глибина рівня води у пласті біля фільтра водозабірної свердловини, м.

Таким чином, дебіт недосконалої свердловини у напірному пласті і розташованій далеко від відкритих джерел живлення визначають за формулою [1]:

$$Q_{\text{доб}} = \frac{2,73K_{\phi} mS}{\lg R / r + 0,43(\xi_1 + \xi_2)} = K_t q_{\text{пит}} S, \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (10)$$

де r – радіус свердловини, м; R – радіус впливу свердловини, м; S – зниження статичного рівня води в свердловині при відкачуванні з неї витрати Q , м; $q_{\text{пит}}$ – питомий дебіт свердловини, м³/добу·м; K_t – коефіцієнт зменшення питомого дебіту свердловини внаслідок її недосконалості; ξ_1 – фільтраційний опір, зумовлений недосконалістю свердловини, визначається за графіками на рис. 1, якщо фільтр свердловини примикає до покрівлі або підшви водоносного пласта, або на рис. 2, якщо фільтр розміщений у середній частині водоносного горизонту залежно від співвідношень l/m і m/r ; l – довжина водоприймальної частини свердловини, м; ξ_2 – узагальнений опір фільтра і прифільтрової зони водоприймальної частини свердловини, який залежить від типу фільтра, форми, кількості і розмірів прохідних отворів та їх взаємодії, характеристики водоносних порід, контактуючих з фільтром, а також ступеня за-

кольматованості їх осадом, що виділяється з води, тобто від терміну експлуатації свердловини і фільтра.

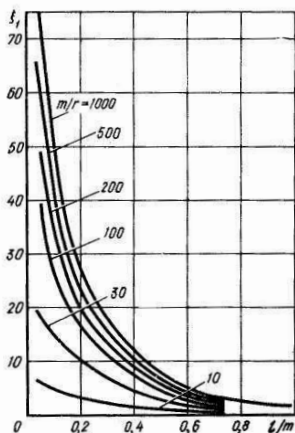


Рис. 1. Графік функції ξ_1 для розрахунку недосконалих водозабірних свердловин з фільтрами, що примикають до покрівлі або підшови пласта

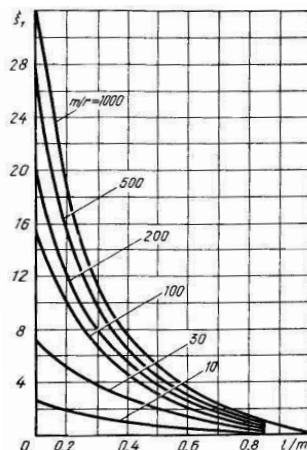


Рис. 2. Графік функції ξ_1 для розрахунку недосконалих водозабірних свердловин з фільтром, розташованим у середній частині пласта

Як бачимо, коефіцієнт K_t залежить від багатьох факторів:

$$K_t = f(t; K_\phi; m; S; R; r; \xi_1; C_0; d_0), \quad (11)$$

де C_0 – концентрація забруднень у воді, що надходить з пласта, мг/дм³; d_0 – діаметр прохідних отворів фільтра, мм.

Проаналізуємо зміну у часі цього коефіцієнта для різного типу свердловин.

Недосконала свердловина в напірному водоносному пласті

Розглянемо роботу свердловини при таких вихідних даних: потужність водоносного пласта $m = 15$ м; довжина водоприймальної частини свердловини $l = 6$ м; радіус свердловини $r = 0,1$ м; коефіцієнт фільтрації водоносного пласта $K_\phi = 10$ м/добу; радіус впливу свердловини $R = 150$ м. Максимально можливе зниження статичного рівня води в свердловині $S_{\max} = 10$ м. Свердловина обладнана сітчастим фільтром (сітка № 12/90), розташованим у середній частині пласта.

Для порівняння приведено розрахунок притоку води до досконалої свердловини і сталому русі підземного потоку (тобто, якби $l = m$ і не було фільтра), що визначається за формулою Дюпюї:

$$Q_{\text{д. макс}} = \frac{2,73 K_\phi m S_{\max}}{\lg R/r} = q_{\text{пит}} S_{\max}, \quad \text{м}^3/\text{добу}. \quad (12)$$

Для даного випадку $Q = 1289,3 \text{ м}^3/\text{добу}$ при питомому дебіті свердловини $q_{\text{пит}} = 128,9 \text{ м}^3/\text{добу} \cdot \text{м}$.

Для нової свердловини за графіком на рис. 2 при $l/m = 0,4$ і $m/r = 150$ знаходимо $\xi_1 = 6$, а за графіком на рис. 3 $\xi_2 = 3$.

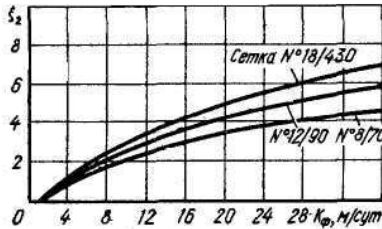


Рис. 3. Графік функції ξ_2 для врахування типу фільтра при розрахунках недосконалих водозабірних свердловин

За формулою (10) максимальний дебіт такої свердловини на початку її роботи становить

$$Q_{\text{н.д. max}} = \frac{2,73 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 10}{\lg 150 / 0,1 + 0,43(6 + 3)} = 581,2 \text{ м}^3/\text{добу},$$

тобто коефіцієнт зниження питомого дебіту свердловини внаслідок її недосконалості дорівнює

$$K_0 = \frac{Q_{\text{н.д. max}}}{Q_{\text{д. max}}} = 581,2 / 1289,3 = 0,45 \cdot$$

Внаслідок недосконалості свердловини, обладнаної сітчастим фільтром, її максимальний дебіт на початку експлуатації зменшується на 55% порівняно з досконалою свердловиною в цьому ж водоносному пласті. В цьому зменшенні недосконалість за ступенем розкриття пласта становить 36,7% і недосконалість за характером розкриття пласта – 17,3%.

При експлуатації свердловини внаслідок обростання фільтра та прифільтрової зони осадом, що вноситься з пласта або виділяється з води, збільшується гідравлічний опір рухові води із пласта у свердловину, тобто збільшується узагальнений опір фільтра і прифільтрової зони ξ_2 , що призводить до зменшення дебіту свердловини $Q_{\text{доб}}$, а відповідно і коефіцієнта K_t при $S_{\text{max}} = \text{const}$.

У таблиці та на рис. 4 показано результати досліджень показників роботи свердловини при збільшенні узагальненого опору фільтра і прифільтрової зони ξ_2 .

Показники роботи свердловини при зростанні гідравлічного опору фільтра

Найменування показників	Значення показників при ξ_2				
	3	5	10	15	20
Максимальна витрата води Q_{\max} , м ³ /добу	581,2	518,0	407,2	335,5	285,2
Питомий дебіт свердловини $q_{\text{пит}}$, м ³ /добу·м	58,1	51,8	40,7	33,5	28,5
Коефіцієнт зменшення питомого дебіту K_t	1	0,89	0,70	0,58	0,49
Втрати напору у фільтрі $h_{\text{ф}}$, м	2,78	4,12	6,48	8,01	9,08

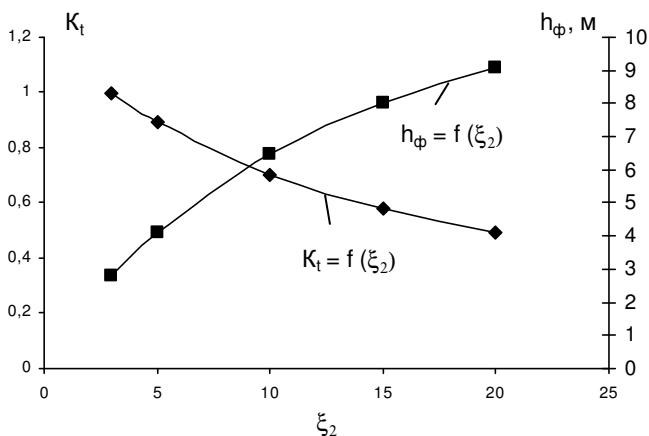


Рис. 4. Графіки залежності коефіцієнта K_t і втрат напору у фільтрі $h_{\text{ф}}$ від фільтраційного опору ξ_2

Коефіцієнт зменшення питомого дебіту свердловини визначається за формулою:

$$K_{t,i} = Q_i / Q_0, \quad (13)$$

де Q_0 і Q_i – дебіт свердловини, що визначався за формулою (10) відповідно для початку її експлуатації і через певний проміжок часу для відповідного $\xi_{2,i}$.

Втрати напору у фільтрі визначались за формулою (4).

З таблиці та рис. 4 видно, що при збільшенні фільтраційного опору рухові води із водоносного пласта у свердловину ξ_2 приблизно в 7 разів та при однакових відмітках динамічного рівня води в ній втрати напору у фільтрі зростають більш ніж у 3 рази, а дебіт свердловини зменшується наполовину.

Свердловина в безнапірному водоносному пласті

Для визначення величини фільтраційного опору, зумовленого характером розкриття безнапірного водоносного шару ξ_2 , та його змін у процесі експлуа-

тації водозабірної свердловини можна скористатися такими розрахунками (рис. 5).

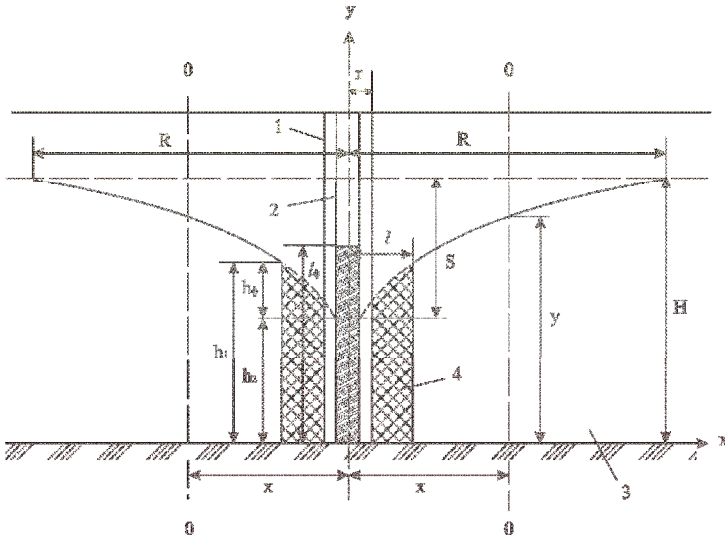


Рис. 5. Розрахункова схема притоку води до свердловини в безнапірному водоносному пласті: 1 – водозабірна свердловина; 2 – фільтрова колона; 3 – безнапірний водоносний пласт; 4 – прифільтрова зона

Витрата води, що проходить через циліндричну поверхню 0-0, проведена на відстані x від осі свердловини, визначається за формулою:

$$Q = \omega V, \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (14)$$

де ω – площа цієї поверхні, м^2 ; V – швидкість руху води, $\text{м}/\text{добу}$.

$$\omega = 2\pi x u; \quad (15)$$

$$v = K_\phi I = K_\phi \frac{dy}{dx}. \quad (16)$$

Отже,
$$Q = 2\pi x u K_\phi \frac{dy}{dx}. \quad (17)$$

Розділивши перемінні x та y і враховуючи, що вони змінюються: x від l до R та y відповідно від h_1 до H після інтегрування отримали формулу для визначення витрати води із досконалої свердловини, що живиться безнапірними водами:

$$Q = \frac{\pi K_{\phi} (H^2 - h_1^2)}{\ln \frac{R}{\ell}} = \frac{1,36 K_{\phi} (H^2 - h_1^2)}{\lg \frac{R}{\ell}}, \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (18)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації водоносного пласта, м/добу; R – радіус депресійної воронки, м; H і h_1 – глибина рівня води відповідно у водоносному пласті та перед прифільтровою зоною свердловини; ℓ – відстань від осі свердловини до граничної поверхні прифільтрової зони, що контактує з породою водоносного пласта.

Припускається, що внаслідок механічного виносу дрібних частинок водоносної породи (суфозія), відкладення осаду з гідроксиду заліза, що виділяється з води при контакті з киснем, а також внаслідок корозії матеріалу фільтра навколо свердловини утворюється прифільтрова зона висотою h_1 і товщиною $l - r$, де r – радіус свердловини.

При тривалій експлуатації свердловини водопрopusкна здатність цієї зони (коефіцієнт фільтрації $K_{\phi,п}$) зменшується, тобто

$$K_{\phi,п} < K_{\phi}, \quad (19)$$

а втрати напору при фільтруванні однакової витрати води збільшуються. Швидкість руху води в цій зоні визначається за формулою:

$$V = K_{\phi,п} \frac{h_{\phi}}{\ell - r}, \text{ м/добу}, \quad (20)$$

де h_{ϕ} – втрати напору у фільтрі і прифільтровій зоні товщиною $l - r$, м.

Швидкість виходу води із прифільтрової зони у свердловину

$$V = \frac{Q}{2\pi r h_2}, \text{ м/добу}, \quad (21)$$

де h_2 – глибина рівня води у свердловині, м.

Прирівнюючи праві частини виразів (20) і (21) після перетворень, отримали формулу для визначення втрат напору у фільтрі і прифільтровій зоні:

$$h_{\phi} = \frac{Q(\ell - r)}{2\pi r K_{\phi,п} (H - S)}, \text{ м}, \quad (22)$$

де S – глибина зниження рівня води в свердловині при відкачуванні з неї витрати води Q .

При визначенні витрати води із недосконалої свердловини, що живиться безнапірними водами, до безрозмірного показника $\ln R/r$ необхідно додати безрозмірні фільтраційні опори ξ_1 і ξ_2 , які враховують додаткове погіршення умов фільтрування води із водоносного пласта у свердловину:

$$Q = \frac{\pi K_{\phi} (H^2 - h_2^2)}{\ln \frac{R}{r} + \xi_1 + \xi_2} = \frac{1,36 K_{\phi} (2H - S) S}{\lg \frac{R}{r} + 0,43(\xi_1 + \xi_2)}, \text{ м}^3/\text{добу}. \quad (23)$$

Якщо висота робочої поверхні фільтра l_{ϕ} більша глибини стовпа води в свердловині h_2 (рис. 5), то величину ξ_1 можна приймати рівною 0, а фільтраційний опір ξ_2 визначати за формулою

$$\xi_2 = \left(\frac{l - r}{r} \right) \frac{K_{\phi,п}}{K_{\phi}} . \quad (24)$$

Як бачимо, величина фільтраційного опору ξ_2 зростає при збільшенні товщини прифільтрової зони свердловини $l - r$ та зменшенні її коефіцієнта фільтрації $K_{\phi,п}$.

При експлуатації свердловини збільшується фільтраційний опір ξ_2 . Визначити його величину через деякий час роботи фільтра практично неможливо, оскільки складно визначити величини параметрів l і $K_{\phi,п}$. Тому для практичного використання при дослідженні роботи діючих свердловин рекомендується користуватись такою залежністю:

$$\xi_{2,i} = \frac{3,16K_{\phi}(2H - S_i)s_i}{Q_i - 2,31g \frac{R}{r}} . \quad (25)$$

У цій формулі перемінними впродовж терміну експлуатації свердловини є витрата води з неї Q_i та зниження статичного рівня S_i .

Висновки

1. При розрахунку водозабірних свердловин необхідно враховувати гідравлічні опори їх недосконалості за ступенем і характером розкриття пласта відповідно ξ_1 і ξ_2 .

2. При експлуатації свердловини фільтраційний опір ξ_2 збільшується і його рекомендується визначати за формулою (25).

1. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534с.
2. Тугай А.М. Наукове обґрунтування продуктивності водозабірних свердловин систем водопостачання: автореф. дис. докт. техн. наук / А.М. Тугай– Рівне, 2002. – 32 с.
3. Гаврилко В.М., Алексеев В.С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
4. Тугай А.М. Використання методу фільтраційних опорів для розрахунку підземних водозаборів // Водне господарство України. – 2001. – № 1-2. – С. 29-32.
5. Тугай А.М. Вплив зростання гідравлічних опорів свердловин на динаміку зміни їх питомих дебітів // Коммунальное хозяйство городов. – К.: Техніка. – 2002. – № 38. – С.122-126.
6. Тугай А.М. Практичні рекомендації по розрахунку механічного кольмотажу фільтрів водозабірних свердловин // Водне господарство України. – 2002. – № 3-4. – С.11-13.
7. Тугай А.М. Визначення динаміки зміни рівнів води свердловин при їх кольматції сполуками заліза // Вісник РДТУ. – № 1 (14). – Рівне, 2002. – С. 107-115.

Рецензент: д.т.н., професор Орлов В.О. (НУВГП)