

раїни. – 2010. – № 3. – С.61-67.

3.Венецианов Е.В., Рубинштейн Р.Н. Динамика сорбции из жидких сред. – М.: Наука, 1983. – 237 с.

4.Ojga C.S.P., Gragam N.J.D. Theoretical estimates of bulk specific deposit in deep bed filters // Weter Res. – 1993. – 27, № 3. – P.377-387.

5.Поляков В.Л. О математическом моделировании и инженерных расчетах осветления суспензии фильтрованием с учетом структуры осадка // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2009. – Вип.13. – С.109-119.

6.Поляков В.Л. Расчет фильтрования суспензий через многослойную загрузку при линейной кинетике массообмена // Химия и технология воды. – 2008. – 30, №1. – С.3-31.

7.Поляков В.Л. Эффективное решение задачи фильтрования суспензии через двухслойную загрузку при линейной кинетике массообмена // Химия и технология воды. – 2010. – 32, №6. – С.3-13.

Получено 06.01.2010

УДК 628.112

А.М.ТУГАЙ, д-р техн. наук, Ю.М.ПІКУЛЬ

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ВОДОЗАБІРНИЙ КОЛОДЯЗЬ ПОБЛИЗУ СМУГОПОДІБНОГО ЛІТОЛОГІЧНОГО ВІКНА**

Запропоновано математичну модель припливу підземної рідини до трубчастого колодязя від смугоподібного літологічного вікна. Представлено рішення у випадку експлуатації окремого водозабірної колодязя в згаданих умовах. Надано рекомендації щодо обліку додаткових фільтраційних опорів смугоподібного літологічного вікна.

Предложена математическая модель притока подземной жидкости к трубчатому колодцу от полосообразного литологического окна. Представлены решения для расчета основных параметров водозаборного колодца в упомянутых условиях. Предоставлены рекомендации относительно учета дополнительных фильтрационных сопротивлений полосообразного литологического окна.

The mathematical model of underground liquid inflow to the water well by stripe-shaped lithologic opening are offered. Are represented the evaluations for engineering calculations of the water well basic parameters in mentioned condishons. The recommendations in relation to account of stripe-shaped lithologic opening additional resistances are given.

*Ключові слова:* водопостачання, підземні води, режим фільтрації, водозабірні колодязі, літологічне вікно, математична модель.

Однією з гострих проблем для багатьох регіонів України є забезпечення надійного і безперебійного водопостачання населення сіл і міст питною водою. В умовах дефіциту поверхневих вод, і в цілому їх забрудненого стану, відсутності стандартних умов забору підземних вод, одним з шляхів подолання проблеми водопостачання є використання підземних вод у складних природних умовах.

З точки зору гідрогеологічної, гідродинамічної та гідрохімічної раціональності водозабору, навіть у складних природних умовах, ви-

ходить, що існують такі місця, де водозабори розміщувати вигідніше за інші. Причому, таким ділянкам родовищ підземних вод виділених для експлуатації можуть бути характерні певні типові умови, що сформовані протягом довготривалих природних процесів, а також кліматичні, географічні та геоморфологічні особливості формування експлуатаційних запасів підземних вод.

Зазначимо, що важливою складовою експлуатаційних ресурсів підземних вод, на нашу думку, є додаткові ресурси, котрі виникають лише під час експлуатації водозаборів. Загальна витрата природного живлення  $Q_{np}$  протягом експлуатації може збільшуватись до певної величини  $\Delta Q_{op}$ , на відміну від природних запасів  $Q_{пз}$  і природних ресурсів  $Q_{np}$ , величина яких протягом експлуатації водозабору може тільки зменшуватись [1]. Додаткове зосереджене живлення водозаборів може існувати в деяких точках чи окремих обмежених ділянках області фільтрації. Прикладом такого живлення може бути перетікання через літологічні вікна – локальні ділянки водоносної породи у майже непроникних шарах, що поділяють водоносні горизонти [2].

Слід зауважити, що величина можливого відбору підземних вод визначається не лише величиною природних та додаткових ресурсів, розміщенням трубчастих колодязів відносно областей живлення та розвантаження підземного стоку, а й фільтраційними опорами, які виникають в процесі руху підземної рідини до водозабірних колодязів при експлуатаційному пониження рівнів. У водоносному шарі може бути достатньо води, але якщо мають місце великі фільтраційні опори, то можливості використання підземних вод достатньо обмежені. Усі ці фактори вимагають їх врахування при розрахунках продуктивності трубчастих колодязів і, звичайно, при їх експлуатації поблизу літологічних вікон.

Згідно з теоретичними висновками Ф.М.Бочевера [3], додаткове живлення водозабірних колодязів від літологічних вікон, може повністю компенсувати відбір підземних вод при водопровідності живлячого шару набагато більший за водопровідність основного та при високій водовіддачі живлячого шару. Тоді літологічне вікно можна розглядати як межу з постійним напором а розрахунки проводити за залежностями усталеного режиму фільтрації.

Для згаданого випадку припускають, що  $H_0 \approx H_e \approx H_n$ , де  $H_e$ ,  $H_n$  – напори у основному (верхньому) та живлячому (нижньому) водоносних горизонтах;  $H_0$  – напір в основному горизонті до початку

відкачки. Ця передумова виконується, наприклад, у випадку виникненням фільтрації з річок або при значних смісних характеристиках живлячого шару, у 10-100 разів більше основного експлуатаційного горизонту. Тобто тоді, коли водоносний шар призначений до експлуатації є малопотужним у порівнянні з більш потужним живлячим водоносним горизонтом.

Відмітимо, що фактично при перетіканні через літологічне вікно, розміщене у майже непроникному поділяючому шарі, потік повинен долати додатковий опір, який виникає при фільтрації води через шар геологічних порід на ділянці вікна, їх водопроникності, конфігурації та розмірів вікна, величини його врізу у водотривкий прошарок, що може бути пов'язано із закольматованістю, закарстованістю та розмитістю водотривкого прошарку на ділянці зосередженого перетікання. За аналогією до перетікання по всій площі фільтрації вказані параметри можуть значно впливати на величину (інтенсивність) додаткового живлення при експлуатації трубчатих колодязів.

Тому, на відміну від існуючих рішень [3], нижче розглянуто математичну модель, яка описує рух підземної рідини від смугоподібного літологічного вікна до водозабірною колодязя, в якій враховано додатковий фільтраційний опір, що виникає при фільтрації води через шар порід на його ділянці. Смугоподібні літологічні вікна можуть виникати під впливом ерозійної діяльності річок, давніх тектонічних процесів (скидів, насувів, розломів) [2].

Загальне рішення задачі припливу підземних вод від смугоподібного літологічного вікна (для будь-якого геологічного складу порід на ділянці вікна) до водозабірною колодязя можна отримати у випадку симетричної схеми фільтрації, зображеної на рисунку.

Для цієї схеми основне диференційне рівняння руху підземної води можна записати у вигляді:

$$a_1 \left( \frac{\partial^2 S_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_1}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial S_1}{\partial t} = Q \delta(x - x_0)(y - y_0), \quad (1)$$

де  $a_1 = T_1 / \mu$  – п'єзопровідність експлуатаційного шару;  $T_1 = k_1 m_1$  і  $\mu$  – водопровідність і водовіддача експлуатаційного шару;  $S_1 = H_0 - H_1$ ,  $H_1$  – відмітка рівня підземних вод експлуатаційного шару під час відкачки;  $Q$  – дебіт трубчастого колодязя;  $\delta(x - x_0)(y - y_0)$  – дельта-функція Дірака [4], що дорівнює одиниці в колодязі або нулю поза ним, тобто

$$\delta(x-x_0)(y-y_0) = \begin{cases} 1, & \text{при } x = x_0, y = y_0; \\ 0, & \text{при } x \neq x_0, y \neq y_0. \end{cases}$$

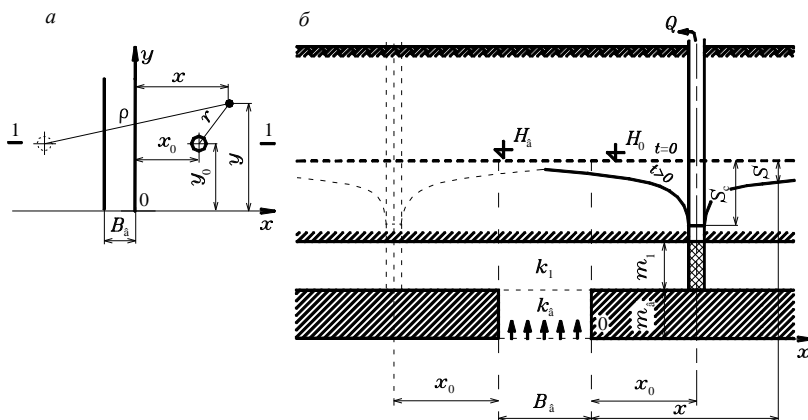


Схема симетричної фільтрації до трубчастого колодязя від смугоподібного літологічного вікна:  
а – план; б – розріз по 1-1.

На межі смугоподібного літологічного вікна для вирішення рівняння (1) ставиться умова третього роду:

$$x = 0, \quad \frac{\partial S_1}{\partial x} - \bar{\beta} S_1 = 0, \quad (2)$$

де  $\bar{\beta} = 1/\Delta L$  – коефіцієнт, що характеризує додатковий фільтраційний опір, що виникає при фільтрації через шар геологічних порід на ділянці вікна.

Розрахункові залежності для визначення додаткового опору  $\Delta L$  при різному складі порід на його ділянці та ширині вікна  $B_0$  наведено в [2].

Результат рішення рівняння (1) з умовою (2) можна записати у вигляді:

$$S = \frac{Q}{4\pi T_1} (R_1 + R_2).$$

$$\text{Тут } R_1 = -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_1 t}\right) + Ei\left(-\frac{\rho^2}{4a_1 t}\right);$$

$$R_2 = 4e^{\frac{\bar{\beta}(x+x_0)+\bar{\beta}^2 a_1 t - \frac{(y-y_0)^2}{2a_1 t}}{2a_1 t}} \int_{\frac{x+x_0}{2\sqrt{a_1 t}}}^{\infty} e^{-(u+\bar{\beta}\sqrt{a_1 t})^2} \frac{udu}{u^2 + \frac{(y-y_0)^2}{4a_1 t}};$$

$-Ei(-z)$  – інтегральна показникова функція, значення якої наведено,

наприклад в [3];  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ ;  $\rho = \sqrt{(x+x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ .

Рішення аналогічної в математичному відношенні задачі, але у зв'язку з вирішенням іншої наукової проблеми, було отримано в [5], де розглядалося температурне поле труби в масиві, причому на межі масив-повітря передбачалась наявність теплообміну, тобто, як і для нашої задачі, приймалась умова третього роду.

Для усталеного режиму фільтрації ( $t = \infty$ ) функції  $R_1$  і  $R_2$  можна спростити:

$$R_1 = 2 \ln \frac{\rho}{r}, \quad R_2 = 4e^{\bar{\beta}(x_0+x)} \int_{\bar{\beta}(x_0+x)}^{\infty} \frac{e^{-z} z dz}{z^2 + \bar{\beta}^2 (y-y_0)^2};$$

у самому колодязі, коли  $r = r_c$  і  $2x_0 \ll r_c$ , позначивши відстань від колодязя до смугоподібного вікна  $x_0 = L$ , для визначення дебіту колодязя маємо:

$$Q = \frac{2\pi S_c T_1}{\ln \frac{2L}{r_c} - 2e^{2\bar{\beta}L} Ei(-2\bar{\beta}L)}. \quad (3)$$

Аналогічне рішення для випадку усталеної фільтрації, отримане методом фільтраційних опорів, має вигляд [2]:

$$Q = 2\pi S_c T_1 \left/ \ln \frac{2L'}{r_c} \right., \quad (4)$$

де  $L' = L + \Delta L$ .

Для оцінки та порівняння отриманих результатів у табл.1 наведено відношення дебітів:

$$\frac{Q_{(4)}}{Q_{(3)}} = \frac{\ln \frac{2L}{r_c} - 2e^{2\bar{\beta}L} Ei(-2\bar{\beta}L)}{\ln \frac{2(L+\Delta L)}{r_c}},$$

де  $Q_{(4)}$  – дебіт окремого колодязя поблизу смугоподібного вікна, отриманий за формулою (4);  $Q_{(3)}$  – дебіт колодязя, отриманий за формулою (3);  $r_c$  – радіус водоприймальної частини трубчастого колодязя, приймаємо  $r_c = 0,1$  м, що характерно для водозабірних колодязів.

Таблиця 1

$L, \text{ м}$	$Q_{(4)}/Q_{(3)}$ при $\Delta L/L$						
	0,1	0,3	0,5	1	3	5	10
50	1,000	1,000	1,001	1,004	1,020	1,035	1,063
100	1,000	1,000	1,001	1,004	1,018	1,032	1,059
200	1,000	1,000	1,001	1,003	1,017	1,030	1,055
300	1,000	1,000	1,001	1,003	1,016	1,029	1,053

Таким чином, при експлуатації трубчастого колодязя поблизу смугоподібного вікна при  $L \geq 50$  м і  $\Delta L/L \leq 3$  відносна похибка складає  $\left| Q_{(3)}/Q_{(4)} - 1 \right| \times 100 \leq 2 \%$ . В іншому випадку дебіт  $Q_{(4)}$ , отриманий в результаті рішення задачі в гідромеханічній постановці, буде більшим ніж  $Q_{(3)}$ .

Для порівняння отриманих нами результатів, в яких враховано додаткові опори смугоподібного літологічного вікна, з опорами, в яких не враховано цей параметр, у табл.2 наведено відношення дебітів  $Q_{(5)}$

за формулою (5) до дебітів  $Q_{(4)}$  для випадку  $r_c = 0,1$  м, тобто

$$\frac{Q_{(5)}}{Q_{(4)}} = \frac{\ln \frac{2(L + \Delta L)}{r_c}}{\ln \frac{2L}{r_c}},$$

де  $Q_{(5)}$  – дебіт водозабірний колодязя розміщеного на відстані  $L$  від межі з постійним напором (за яку звичайно приймають водойму, канал, водосховище, літологічне вікно), що визначається за відомою формулою Форхгеймера

$$Q = \frac{2\pi S_c T_1}{\ln \frac{2L}{r_c}}. \quad (5)$$

Таблица 2

L, м	$Q_{(5)}/Q_{(4)}$ при $\Delta L/L$					
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	5
50	1,001	1,007	1,014	1,059	1,100	1,259
100	1,001	1,006	1,013	1,053	1,091	1,263
200	1,001	1,006	1,011	1,049	1,084	1,216
400	1,001	1,005	1,011	1,045	1,077	1,199

З табл.2 видно, що зведення смугоподібного вікна до межі з по-  
стійним напором не завжди є виправданим. Неврахування опорів літо-  
логічного вікна може призвести до суттєвого завищення дебіту водо-  
забірних колодязів, коли  $\Delta L > 0,1L$ . З іншого боку, якщо величина  
опору підземного потоку  $\Delta L$  відповідає умові  $\Delta L \leq 0,1L$ , можна  
вважати, що реальна довжина потоку майже не змінюється. При від-  
стані  $L \geq 50$ м і  $\Delta L/L \leq 0,1$  (табл.2) відносна похибка складає  
 $\left| Q_{(5)}/Q_{(4)} - 1 \right| \times 100 < 1,4 \%$ . У цьому випадку впливом такої зони де-  
формації на рух підземних вод звичайно можна знехтувати, і потік по  
всій його довжині можна вважати досконалим.

Таким чином, нами запропонована математична модель, яка опи-  
сує фільтрацію підземної рідини до водозабірному колодязю від смуго-  
подібного літологічного вікна, з урахуванням додаткових фільтрацій-  
них опорів літологічного вікна. В результаті реалізації математичної  
моделі отримано рішення для інженерного розрахунку водозабірному  
колодязю, що експлуатується поблизу смугоподібного літологічного  
вікна в усталеному та неусталеному режимах фільтрації. Виконано  
порівняння рішень, отриманих різними методами. Наведено рекомен-  
дації щодо врахування додаткових фільтраційних опорів смугоподіб-  
ного літологічного вікна  $\Delta L$  в інженерних розрахунках.

1.Штенгелов Р.С. Поиски и разведка подземных вод: конспект лекций / Балансо-  
вая структура (источники формирования) ЭЗ подземных вод [Электронный ресурс]: Все  
о геологии. – Режим доступа: [http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1177326&uri=](http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1177326&uri=part1cont.htm)  
part1cont.htm – Название с экрана.

2.Пікуль Ю.М. Підземні водозабори в умовах зосередженого живлення // Пробле-  
ми водопостачання, водовідведення та гідраліки: Наук.-техн. зб. Вип.12. – К.: КНУБА,  
2009. – С.42-48.

3.Бочеве́р Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загряз-  
нений. – М.: Недра, 1979. – 254 с.

4.Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. –  
599 с.

5.Бочеве́р Ф.М. Оценка производительности береговых водозаборов с учетом не-  
совершенства речных русел // Труды ВНИИ ВОДГЕО (Гидрогеология). Вип.13. – М.:  
Госстрой СССР, 1966. – С.84-115.

Отримано 10.02.2010