

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОЇ ВОДОЗАБІРНОЇ СВЕРДЛОВИНИ ІЗ НАПІРНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ

Ю. В. Смолій

здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня, 2 курс,

спеціальність «Будівництво та цивільна інженерія»,

навчально-науковий інститут будівництва та архітектури

Науковий керівник – к.т.н., доцент В. П. Косінов

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

Проведено аналітичні дослідження, які мали на меті вдосконалення існуючої методики розрахунку і проєктування вертикальних водозабірних свердловин, які відбирають воду із напірного водоносного горизонту з метою надійного забезпечення водою об'єктів водопостачання і безпечної експлуатації обладнання персоналом експлуатаційної служби із застосування методів прогнозного аналізу і моделювання.

Ключові слова: водозабірна свердловина, напірний водоносний горизонт, гідравлічна характеристика свердловини, дебіт свердловини, пониження статичного рівня, відкачка води із свердловини, експлуатаційний насос.

Analytical studies were conducted to improve the existing methodology for calculating and designing vertical water intake wells that draw water from a pressurized aquifer in order to reliably provide water to water supply facilities and ensure safe operation of equipment by maintenance personnel using predictive analysis and modeling methods.

Keywords: water intake well, pressure aquifer, hydraulic characteristics of the well, flow rate of the well, lowering of the static level, pumping water from the well, operational pump.

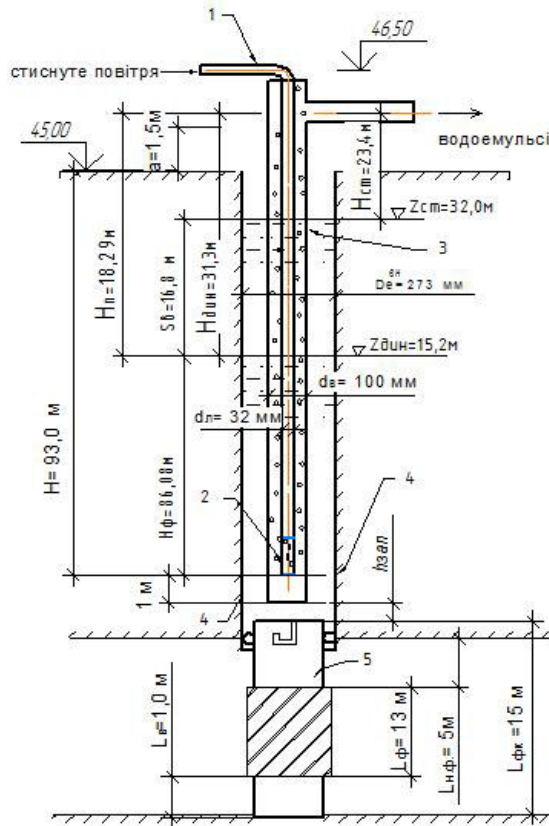
У процесі проєктування водозабірних свердловин гідравлічні характеристики напірного водоносного горизонту (Q – дебіт, S – пониження статичного рівня) отримують, як правило, шляхом досліджень в натурних умовах, в наслідок яких величина дебіту свердловини може бути отримана після зміни (збільшення) величини пониження статичного рівня на величину ΔS . Для отримання координат точок гідравлічної характеристики свердловини $Q-S$ у якості пристрою для підйому води із свердловини, як правило, застосовують ерліфтну установку, яка конструктивно складається з двох труб (водопіднімальної та повітряної) (рис. 1).

Така установка має мінімальну кількість деталей, що знаходяться у стані тертя (у порівнянні із насосом), що запобігає ерозійним процесам у водопіднімальній трубі при підйомі водоемульсії на поверхню свердловини.

Аналіз методів побудови гідравлічної характеристики свердловини $Q-S$ були наведені в роботах Тугая А. М., Орлова В. О., Шадури В. О. [4, С. 57–60].

Однак, надійнішого, або економічного обґрунтування визначення фактичних характеристик і оптимального вибору насосного обладнання, або прогнозного моделювання на сьогодні немає. Нагальним завданням також є забезпечення достатньої економічної оптимальності роботи свердловини та підібраного до неї насосного обладнання.

Для напірного водоносного горизонту графічний вигляд характеристики виду $Q-S$ (за результатами досліджень різних фахівців) є прямолінійною залежністю, яка обов'язково виходить з точки початку координат – $O(0,0)$ (рис. 2).



Умовні позначення:

- 1 - повітряна труба;
- 2 - змішувач (форсунка);
- 3 - водопіднімальна труба;
- 4 - експлуатаційна колона;
- 5 - фільтрова колона.

Рис. 1. Приклад схеми ерліфтної установки для відкачування води із вертикальної свердловини

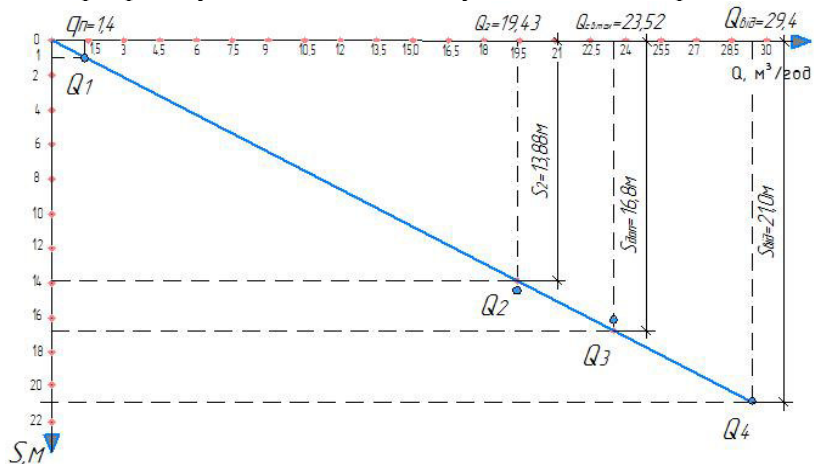


Рис. 2. Характеристика свердловини $Q-S$ в діапазоні витрат Q_i від 0 до 30 м³/год та діапазоні пониження статичного рівня S_i від 0 до 21 м

Таку графічну побудову можна зробити за правилами математики по трьох характерних точках: $A_1(Q_1, S_1)$, $A_2(Q_2, S_2)$, $A_3(Q_3, S_3)$. При цьому, в практиці фізичний зміст координат цих точок наступний:

$$Q_1 = q_{\text{нит.}}, \text{ м}^3/\text{Год}; S_1 = 1,0 \text{ м};$$

$$Q_2 = Q_{\text{р.св.}}, \text{ м}^3/\text{Год}; S_2 = S_{\text{р.}}, \text{ м};$$

$$Q_3 = Q_{\text{макс.св.}}, \text{ м}^3/\text{Год}; S_2 = S_{\text{доп.}}, \text{ м},$$

де $q_{\text{нит.}}$ – питомий дебіт експлуатаційного водоносного горизонту при пониженні статичного рівня води в свердловині на величину. Величина пониження складає $S_1 = 1,0 \text{ м}$;

$Q_{\text{р.св.}}$ – фактичний дебіт одиночної свердловини, який відповідає фактичному відбору води із свердловини під час регламентної експлуатації водозабору;

$S_{\text{р.}}$ – фактичне пониження статичного рівня води у свердловині, яке відповідає фактичному відбору води із свердловини під час регламентної експлуатації водозабору;

$Q_{\text{макс.св.}}$ – максимально можливий дебіт свердловини, тобто максимально допустимий відбір води, який відповідає граничній продуктивності експлуатаційного водоносного горизонту, після якої експлуатація горизонту буде неможлива;

$S_{\text{доп.}}$ – максимально припустиме пониження статичного рівня води в свердловині, яке відповідає максимальному дебіту, м.

Ці параметри, як правило, встановлюють ще в період будівельних відкачок води із свердловини, але їх можна уточнити в процесі експлуатації робочої свердловини на етапі досліджень, які повинні (відповідно до регламенту експлуатації свердловин) проводитись не довше як один раз у два роки. Під час позаштатних ситуацій (як то військові дії) їх обов'язково слід провести після припинення військових дій (перед початком експлуатації водозабірних споруд). Схему відкачок наведено на рис. 3.

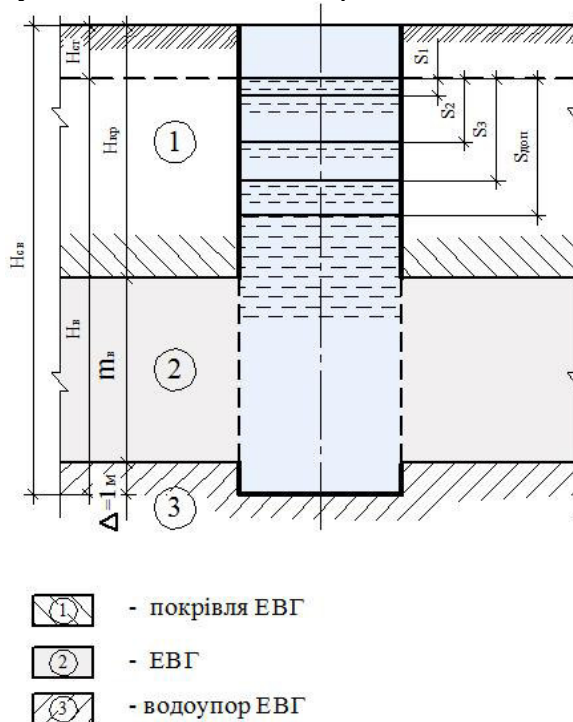


Рис. 3. Схема вертикальної водозабірної свердловини із забором води з напірного водоносного горизонту

Однак, з досвіду дослідних відкачок води під час постійної її експлуатації, слід рекомендувати кілька проміжних точок для уточнення гідравлічної характеристики $Q-S$. За результатами досліджень різних фахівців координатами цих точок є: $A_4(Q_4, S_4)$; $A_5(Q_5, S_5)$; $A_6(Q_6, S_6)$.

Фізичний зміст координат цих точок наступний:

$$Q_4 = 0,5 \cdot Q_{св.макс}, \text{ м}^3/\text{год}; S_4 = S_{p,4};$$

$$Q_5 = 0,75 \cdot Q_{св.макс}, \text{ м}^3/\text{год}; S_5 = S_{p,5}, \text{ м}.$$

Задачами досліджень було встановити прогнозний характер змінюваності фактичного дебіту свердловини $Q_{св.р.}$ від геометричних параметрів свердловини (фактичної глибини свердловини $H_{св.}$, потужності водоносного горизонту m_g), а також гідрогеологічних характеристик самого напірного пласта (глибини залягання статичного рівня води – $H_{ст}$). Основним завданням наших досліджень було отримати прогнозні модельні залежності для встановлення фактичного дебіту свердловини від впливових факторів геометричного і гідравлічного характеру, які дозволять фахівцям-проектантам визначати його величину навіть без проведення детальних відкачок із напірного пласта з цілком достатньою достовірністю.

Так, для розв'язання складної задачі впливу цих геометричних і гідрологічних факторів на максимальний дебіт експлуатаційного водоносного горизонту (ЕВГ) нами були сформовані масиви даних, отриманих експериментальним дослідним шляхом на діючих свердловинах, та перевірені теоретичним прогнозними розрахунками на моделі.

При побудові таких масивів даних використано діапазон варіювання глибини свердловини $H_{св.} = 100 \dots 200 \text{ м}$, діапазон варіювання потужності ЕВГ $m_g = 10 \dots 90 \text{ м}$, діапазон варіювання питомого дебіту $k_1 = q_{нум} = 0,5 \dots 10 \text{ м}^3 / \text{год} \cdot \text{м}$, та найменше співвідношення $k_2 = 0,2$ при врахуванні фактичного стовпа води в свердловині при формуванні величини максимально допустимого пониження $S_{дон.}$. Як правило, у розрахунках іншими дослідниками воно рекомендоване у межах $k_2 = 0,2 \dots 0,3$ [3; 4; 5]

$$S_{дон.} \approx k_2 \cdot (H_g - m_g). \quad (1)$$

Були отримані модельні прогнозні залежності, які дозволяють спрогнозувати величину максимального дебіту свердловини від обраних вище геометричних і гідравлічних параметрів свердловини.

Враховуючи аналогічний характер варіювання величини максимального дебіту свердловини від вищезазначених геометричних характеристик свердловини і ЕВГ запропоновано враховувати на кожному етапі проектування свердловини не самі геометричні характеристики, а їхні співвідношення, які, в свою чергу, можливо наводити (і враховувати чисельно) у вигляді коефіцієнтів.

Першими висновками є:

1) Запропоновані нами співвідношення $m_g / H_{св.}$ та $S_{дон.} / H_{св.}$ мають тенденцію регресійного зменшення при зростанні величин вищевказаних вхідних геометричних параметрів свердловини і ЕВГ, та досягнення ними критичних значень неминуче призводить до регресійного зменшення максимально можливого дебіту свердловини.

2) Отримано масиви даних у вигляді таблиць, з яких можна встановити, при яких числових значеннях співвідношень свердловина практично не віддає воду навіть у максимальній кількості, та її експлуатація економічно недоцільна.

Залежність максимального дебіту $Q_{св.макс.}$ свердловини залежно від співвідношення геометричних характеристик $m_в/H_{св.}$ та $S_{доп.}/H_{св.}$ при $H_{св.} = 100 м, m_г = 10...95 м, H_{ст.} = 5 м, q_{нит.} = 0,5 м^3 / год. \cdot м$

| $m_в$ | $m_в/H_{св.}$ | $H_в$ | $S_{доп.}$ | $S_{доп.}/H_{св.}$ | $Q_{св.макс.}$ |
|-------|---------------|-------|------------|--------------------|----------------|
| 10,0 | 0,100 | 95,00 | 17,000 | 0,170 | 8,50 |
| 15,0 | 0,150 | 95,00 | 16,000 | 0,160 | 8,00 |
| 20,0 | 0,200 | 95,00 | 15,000 | 0,150 | 7,50 |
| 25,0 | 0,250 | 95,00 | 14,000 | 0,140 | 7,00 |
| 30,0 | 0,300 | 95,00 | 13,000 | 0,130 | 6,50 |
| 35,0 | 0,350 | 95,00 | 12,000 | 0,120 | 6,00 |
| 40,0 | 0,400 | 95,00 | 11,000 | 0,110 | 5,50 |
| 45,0 | 0,450 | 95,00 | 10,000 | 0,100 | 5,00 |
| 50,0 | 0,500 | 95,00 | 9,000 | 0,090 | 4,50 |
| 55,0 | 0,550 | 95,00 | 8,000 | 0,080 | 4,00 |
| 60,0 | 0,600 | 95,00 | 7,000 | 0,070 | 3,50 |
| 65,0 | 0,650 | 95,00 | 6,000 | 0,060 | 3,00 |
| 70,0 | 0,700 | 95,00 | 5,000 | 0,050 | 2,50 |
| 75,0 | 0,750 | 95,00 | 4,000 | 0,040 | 2,00 |
| 80,0 | 0,800 | 95,00 | 3,000 | 0,030 | 1,50 |
| 85,0 | 0,850 | 95,00 | 2,000 | 0,020 | 1,00 |
| 90,0 | 0,900 | 95,00 | 1,000 | 0,010 | 0,50 |
| 95,0 | 0,950 | 95,00 | | 0,000 | 0,00 |
| 100,0 | 1,000 | 95,00 | | 0,000 | 0,00 |

ПРИМІТКА: При потужності водоносного шару $m_г \geq 90 м$ та $S_{доп.}/H_{св.} \leq 0,01$ максимальний її дебіт менший за питомий і таку свердловину нерентабельно експлуатувати.

Такі ж масиви отримано для інших співвідношень $m_в/H_{св.}$ та $S_{доп.}/H_{св.}$.

Необхідно математично обґрунтувати оптимальний рівень змінюваності фактичного дебіту свердловини $Q_{св.р.}$ та знайти граничні умови варіювання його величини та встановити впливові фактори, які безпосередньо цей рівень забезпечують.

Для цього пропонуємо скористатися графічним методом для аналізу поставленого завдання.

Розглянемо графічну схему сумісної роботи водозабірної свердловини (гідравлічна характеристика $Q-S$ в загальному вигляді) та роботи експлуатаційного насоса (для робочої зони паспортної характеристики $Q-H$ на рис. 4). Згідно з нею, «робочу зону» ЕВГ, в якій він спроможний забезпечити розрахункову продуктивність, а в разі необхідності і максимальну продуктивність, графічно можна описати фігурою виду $Q_1-Q_4-A_4-A_1-Q_1$. З погляду геометрії вона є прямокутною трапецією. Але, в її межах розрахунковий (фактичний) дебіт може як завгодно варіюватися, що призведе до великого числа варіантів його визначення за формулою $Q_{св.р.і} = k_1 \cdot S_{р.і}$, але «оптимального» варіанту не буде. Тому слід спробувати обмежити розміри цієї трапеції найменшими розмірами її елементів, які з одного боку будуть геометрично малими, а з іншого – будуть забезпечувати економічну і технічну оптимальність визначеного фактичного дебіту ЕВГ.

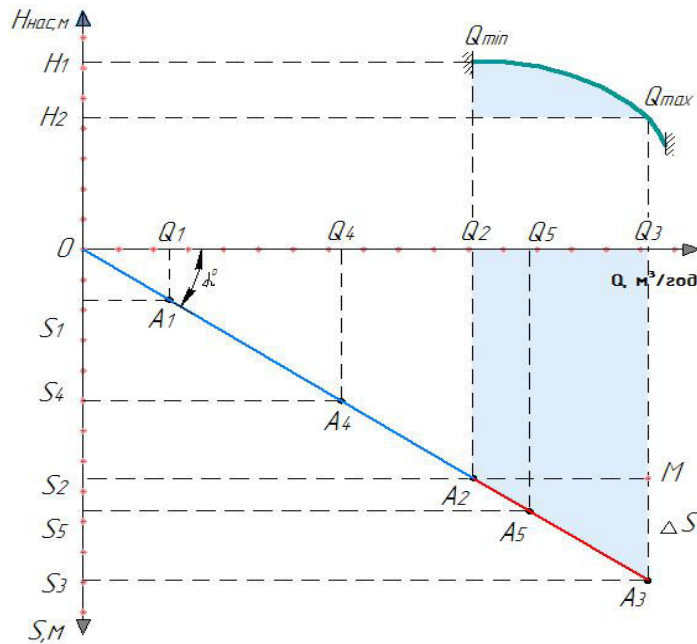


Рис. 4. Схема сумісної роботи водозабірної свердловини (гідрравлічна характеристика $Q-S$ в загальному вигляді) та роботи експлуатаційного насоса (для робочої зони паспортної характеристики $Q-H$ насосів)

Для цього слід створити схему сумісної роботи свердловини та експлуатаційного насоса, який буде відбирати воду із свердловини при відкачці. На схему нанесена тільки «робоча зона» $Q-H$ характеристики насоса (рис. 4). На цю схему додатково накладено «робочу зону» характеристики $Q-S$ свердловини. Це дозволяє уточнити робочі параметри свердловини та їх оптимальність для умов експлуатації свердловини.

Так, на наш погляд, прямокутна трапеція буде мати найменші геометричні розміри та буде наближати розрахунковий (фактичний) дебіт ЕВГ до максимально допустимого, коли пошукана форма трапеції буде мати вигляд виду $Q_2-A_2-A_3-Q_3-Q_2$. З фізичної точки зору ми отримуємо, що фактичний дебіт $Q_2 \rightarrow Q_4 = Q_{св.р.} \rightarrow Q_{св.макс.}$

В якому ж випадку, прямокутна трапеція виду $Q_2-A_2-A_3-Q_3-Q_2$ буде відображати оптимальність обраної величини $Q_{св.р.}$? Очевидно, це відбувається тоді, коли її площа буде мати мінімальну величину, тобто $F_{трап.} \rightarrow \min$. Очевидно, що найменша основа прямокутної трапеції Q_2-A_2 встановлює мінімальний рівень оптимальної роботи свердловини, а Q_3-A_3 – навпаки максимальний рівень.

Завданням є встановити розміри величин Q_3 , S_3 через раніше визначені нами відомі Q_2 та S_2 . Це можна виконати геометричними розрахунками, використовуючи властивості як прямокутної трапеції, так і прямокутного трикутника. Найбільша основа трапеції Q_3-A_3 має геометричну довжину, а фізичний зміст її – це максимально допустиме пониження статичного рівня в свердловині, тобто $a = S_{дон.}$. Найменша основа трапеції b може бути знайдена з рівняння:

$$b = S_{дон.} - \Delta S_{2-3}, \quad (3)$$

де ΔS_{3-2} – приріст для пониження від S_2 до S_3 . Його можна знайти геометричним шляхом із прямокутного трикутника через катет та протилежний кут α' .

$$\Delta S_{3-2} = \Delta Q_{3-2} \cdot ctg \alpha', \quad (4)$$

де – ΔQ_{3-2} приріст продуктивності свердловини від оптимальної (нижньої) межі до максимально можливого дебіту свердловини, тобто $\Delta Q_{3-2} = Q_3 - Q_2$.

Враховуючи, що величина Q_2 повинна відповідати мінімальній подачі експлуатаційного насоса (в робочій зоні характеристики $Q-H$), то приймаємо, що $Q_2 \approx Q_{нас.}^{\min}$, тоді

$$\Delta Q_{3-2} = Q_{св.макс.} - Q_{нас.}^{\min}, \quad (5)$$

$$Q_2 = Q_{св.р.}^{opt.} = Q_{св.макс.} - \Delta Q_{3-2} = Q_{св.макс.} - Q_{нас.}^{\min}. \quad (6)$$

Тоді, враховуючи попередні висновки,

$$ctg\alpha = \frac{1}{tg\alpha} = \frac{1}{q_{шт}}, \quad (7)$$

$$\Delta S_{3-2} = \Delta Q_{3-2} \cdot ctg\alpha = \frac{Q_{св.макс.} - Q_{нас.}^{\min}}{q_{шт}}. \quad (8)$$

Тоді

$$S_2 = S_{дон.} - \frac{Q_{св.макс.} - Q_{нас.}^{\min}}{q_{шт}}. \quad (9)$$

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Встановлено прогнозні залежності в аналітичному вигляді, які дозволяють прогнозувати межі оптимального рівня подачі свердловини, залежно від максимально можливого дебіту свердловини та параметрів робочої зони паспортної характеристики $Q-H$ експлуатаційного насоса.
2. З практичної точки зору фахівець-проектант може підбирати марку насоса і прогнозувати величину розрахункового дебіту свердловини та можливе пониження статичного рівня в ній.

1. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 20014-01-01]. Київ : Мін-во регіон. розвитку, будівництва та ЖКГ, 2013. 283 с. (Державні будівельні норми України). 2. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення населених пунктів України : наказ від 27.11.2015 р. № 302. Київ : Мін. регіон. розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-95#Text> (дата звернення: 23.03.2024). 3. Косінов В. П., Орлов В. О., Червінко А. В. Надійність систем водопостачання та водовідведення : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 228 с. 4. Тугай А. М., Орлов В. О., Шадуря В. О. Бурова справа в водопостачанні. Рівне : НУВГП, 2004. ISBN 966-327-010-12. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/12981/1/1tuay_a_m_orlov_v_o_shadura_v_o_burova_sprava_v_vodopostachan.pdf. (дата звернення: 23.03.2024). 5. Тугай А. М., Орлов В. О. Водопостачання : підручник для вузів. Рівне : РДТУ, 2001.