

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Методичні вказівки
до виконання
розрахунково-графічного завдання
з дисципліни

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ

*(для студентів 2 курсу денної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня
бакалавр напряму підготовки 6.040106 - “Екологія, охорона навколишнього
середовища та збалансоване природокористування ”)*

Харків – ХНАМГ – 2011

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічного завдання з дисципліни “Прикладна механіка рідин і газів ” (для студентів 2 курсу денної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр напряму підготовки 6.040106 - “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування ”) / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В.О. Бараннік – Х.: ХНАМГ, 2011. - 22 с.

Укладач: доцент В. О. Бараннік

Рецензент: доцент Є. Г. Пономаренко

Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст,
протокол № 2 від 22.10.2010 р.

ВСТУП

Метою розрахунково-графічного завдання є поглиблення теоретичних знань та надбання практичних навичок у розрахунках та графічному відображенні кінематичних та динамічних характеристик потоків реальних рідин у напірних трубопроводах, що мають конфігураційні особливості, які впливають на гідродинамічний опір руху.

Об'єктом розгляду є напірний чотирьохколінний трубопровід, через який споживачі мають отримувати воду з певною витратою. Джерелами місцевих гідродинамічних опорів в системі є ділянки за живими перерізами потоку, де відбувається перебудова структури потоку рідини, а саме: вхід потоку з резервуара в трубу, раптове звуження або розширення потоку, місця розташування дифузорів або конфузорів для сполучення колін трубопроводу з різним діаметром, плавний або різкий поворот трубопроводу, місця витікання рідини з труби в резервуар.

В завданні на розрахунково-графічну роботу наводяться основні характеристики системи:

- умовна схема трубопроводу та його специфікація, що визначає геометричну конфігурацію трубопроводу та розташування елементів утворення місцевих опорів;
- матеріал, з якого виготовлено трубопровід і тривалість його експлуатації;
- витрата рідини та зовнішній тиск на вільній поверхні рідини в резервуарах;
- вид (назва) рідини та її температура;

Результатом роботи мають бути визначені або розраховані:

- питома вага рідини, коефіцієнт її кінематичної в'язкості, еквівалентна шорсткість труб;
- лінійні втрати напору в трубопроводі;
- місцеві втрати напору;
- сумарні втрати напору;
- рівень води в резервуарі;
- втрати тиску в трубопроводі;
- висоти напірної лінії в трубопроводі;
- висоти п'єзометричної лінії в трубопроводі;

На підставі проведених розрахунків мають бути:

- побудована напірна лінія;
- побудована п'єзометрична лінія;

Пояснювальна записка до розрахунково-графічної роботи має включати зміст, п'ять розділів, лінійну схему трубопроводу із зазначеними на ній вибраними розрахунковими живими перерізами потоку та креслення напірної та п'єзометричної ліній. Це креслення може бути виконане у відповідному масштабі на міліметровому папері за розміром, що відповідає формату А3, та розміщене у кінці п'ятого розділу. Крім того, мають бути наведені висновки і список використаних літературних та інших джерел.

1. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ

1.1. Рівняння гідродинаміки

Основними рівняннями гідродинаміки, що використовуються при виконанні роботи, є рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі для в'язкої незтискуваної рідини.

1.1.1. Рівняння нерозривності потоку незтискуваної рідини в інтегральній формі має вигляд

$$Q = \omega V = \text{const}, \quad (1)$$

де Q - витрата потоку рідини, м³/с; ω - площа живого перерізу потоку, м²; V - середня в перерізі швидкість потоку, м/с.

З рівняння (1) випливає, що для будь-яких двох живих перерізів потоку середні в перерізах швидкості течії обернено пропорційні площам перерізів потоку:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (2)$$

Для напірного потоку, що протікає в круглій трубі, площа живого перерізу дорівнює:

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3)$$

де d - діаметр труби, м.

Рівняння (2) можна переписати у вигляді

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}. \quad (4)$$

1.1.2. Рівняння Бернуллі для потоку в'язкої (реальної) рідини:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum h_{1-2}, \quad (5)$$

де індекси 1 і 2 відносять до двох довільних живих перерізів потоку; z - геометрична висота будь-якої точки живого перерізу потоку щодо довільної горизонтальної площини порівняння, м; P - гідростатичний тиск, Па; γ - питома (об'ємна) вага рідини, н/м³; α - безрозмірний коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса), що для круглих трубопроводів може бути прийнятим $\alpha=1$; g - прискорення сили ваги, м/с²; $\sum h_{1-2}$ - втрати напору на ділянці потоку рідини від першого до другого живого перерізу, м.

1.2. Втрати напору на подолання гідравлічного опору

Втрати напору на ділянці потоку рідини від першого до другого живого перерізу складаються з втрат напору за довжиною h_L (м) і місцевих втрат напору $\sum h_M$ (м):

$$\sum h_{1-2} = h_L + \sum h_M. \quad (6)$$

1.2.1. Втрати напору за довжиною.

Втрати напору за довжиною ділянки трубопроводу з постійної площею живого перерізу можна обчислити через швидкісний напір за формулою Вейсбаха - Дарсі:

$$h_L = \frac{\lambda}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} L, \quad (7)$$

де λ - безрозмірний коефіцієнт гідравлічного тертя; R - гідравлічний радіус, м; L - довжина ділянки, м.

Гідравлічний радіус визначають як:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (8)$$

де χ - змочуваний периметр живого перерізу потоку, м.

Для напірного потоку у круглій трубі $R = d/4$. Тому вираз (7) можна переписати у вигляді

$$h_L = \frac{\lambda}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} L. \quad (9)$$

Величина коефіцієнта гідравлічного тертя λ загалом залежить від числа Рейнольдса Re_d і шорсткості стінок русла. Розрахунок коефіцієнта гідравлічного тертя для різноманітних режимів течії у круглій трубі можна зробити за універсальною формулою Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re_d} + \frac{A_e}{d} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

де A_e - еквівалентна шорсткість стінок труби, м.

Величина коефіцієнта Рейнольдса визначається співвідношенням

$$Re_d = \frac{Vd}{\nu}, \quad (11)$$

де ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с.

Значення еквівалентної шорсткості A_e і коефіцієнта кінематичної в'язкості ν визначають за довідниками, наприклад, [1].

1.2.2. Місцеві втрати напору

Місцеві втрати напору викликаються опорами, що виникають при зміні площі живого перетину або напрямку потоку.

Величину місцевих втрат напору розраховують за формулою Вейсбаха:

$$h_M = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (12)$$

де ζ - безрозмірний коефіцієнт місцевого опору; V - середня швидкість руху рідини за місцем виникнення місцевого опору, м/с.

1.2.2.1. Втрати напору на раптовому розширенні трубопроводу

Раптовим розширенням вважають місце сполучення за потоком труби меншого діаметра d_1 з трубою більшого діаметра d_2 (рис. 1).

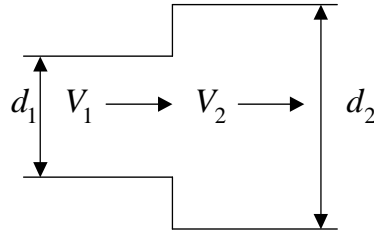


Рис.1 – Раптове розширення трубопроводу

Місцеву втрату напору в цьому випадку можна визначити за формулою Борда:

$$h_{p.p.} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \quad (13)$$

де V_1 і V_2 - швидкості потоку до і після раптового розширення відповідно.

Також можна скористатися формулою (12), якщо величину коефіцієнта місцевого опору визначити виразом

$$\zeta_{p.p.} = \left(\frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} - 1 \right)^2 = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2. \quad (14)$$

Окремим випадком раптового розширення потоку є витікання рідини з труби у відкритий резервуар (басейн) під вільну поверхню рідини, як показано на рис.2.

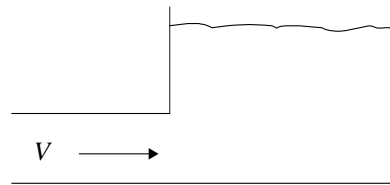


Рис.2 – Витікання рідини в резервуар під вільну поверхню

У цьому випадку втрата напору визначається за формулою

$$h_{\text{внт.}} = \frac{V^2}{2g}. \quad (15)$$

1.2.2.2. Втрата напору на раптовому звуженні трубопроводу

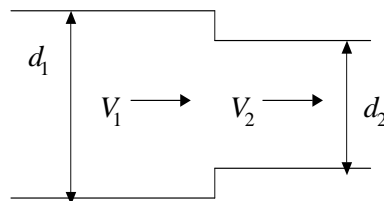


Рис.3 – Раптове звуження трубопроводу

Втрату напору знаходять за формулою (12), в якій коефіцієнт місцевого опору визначається рівнянням:

$$\zeta_{p.з.} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (16)$$

де величину ε визначають за формулою Альтшуля:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}, \quad (17)$$

де величину n знаходять як співвідношення площ або квадратів діаметрів перетину вузької і широкої частин труби:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}. \quad (18)$$

Іншим окремим випадком раптового звуження є вхід потоку з резервуара в трубу. У цьому випадку коефіцієнт місцевого опору у формулі (12) обирають як

$$\zeta_{ex.} = 0,5. \quad (19)$$

1.2.2.3. Плавне розширення трубопроводу

Ділянку труби, що розширюється плавно, називають дифузором (рис.4). Втрати енергії в дифузорі складаються з втрати на тертя по його довжині та втрати, пов'язані з розширенням труби:

$$h_{\text{диф.}} = h_{\text{диф.}L} + h_{\text{диф.}\alpha}. \quad (20)$$

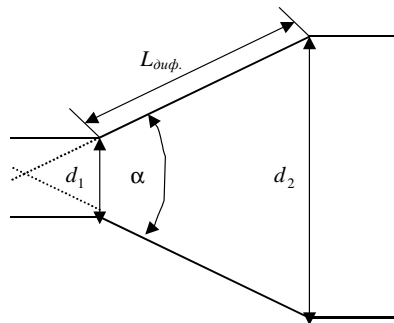


Рис.4 – Геометричні параметри дифузора

Втрата на розширення $h_{\text{диф.}\alpha}$ залежить від кута розкриття α , величина якого визначається за формулою:

$$\alpha = 2 \arcsin \left(\frac{d_2 - d_1}{2L_{\text{диф.}}} \right), \quad (21)$$

де: d_1, d_2 - відповідно, діаметр вузької і широкої труби, що з'єднуються через дифузор, м; $L_{\text{диф.}}$ - довжина лінії перерізу поверхні дифузора площиною, що проходить через вісь трубопроводу, м.

Ця втрата визначається за формулою Борда (13), в яку вводиться коефіцієнт пом'якшення $K_{\text{ном}}$, а саме:

$$h_{\text{диф.}\alpha} = K_{\text{ном}} \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}. \quad (22)$$

Величину коефіцієнта пом'якшення встановлюють за таблицями. При куті розкриття α від 5° до 20° застосовують формулу Ідельчика:

$$K_{\text{ном}} = m \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \sqrt{\operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}, \quad (23)$$

де $m = 3,2$ - для конічного дифузора, і $m = 6,2$ - для прямокутного дифузора.

Вираз (22) можна переписати у вигляді

$$h_{\text{диф.}\alpha} = K_{\text{ном.}} \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (24)$$

Втрата напору за довжиною дифузора визначається за рівнянням

$$h_{\text{диф.}L} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(\frac{d_2^4}{d_1^4} - 1 \right) \frac{V_2^2}{2g} \quad (25)$$

де $\lambda_{\text{ср}}$ - середній по довжині дифузора коефіцієнт гідравлічного тертя, який розраховують за формулою:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (26)$$

де λ_1 , λ_2 - відповідно, величина коефіцієнта гідравлічного тертя у вузькій і широкій трубі, що з'єднуються через дифузор.

У такий спосіб сумарні втрати напору в дифузорі можна визначити за формулою (12), де коефіцієнт місцевого опору має дорівнювати:

$$\zeta_{\text{диф}} = K_{\text{ном.}} \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2 + \frac{\lambda_{\text{ср}}}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(\frac{d_2^4}{d_1^4} - 1 \right) \quad (27)$$

1.2.2.4. Плавне звуження трубопроводу

Ділянку труби, що звужується плавно, називають конфузором (рис.5).

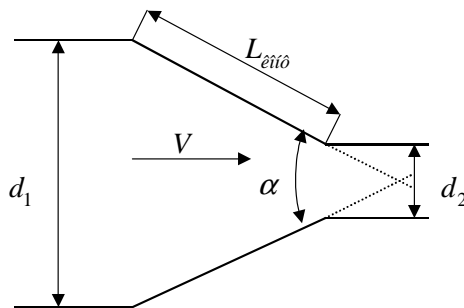


Рис.5 – Геометричні параметри конфузора

Втрати $h_{\text{конф.}}$ механічної енергії в конфузорі складаються з втрати $h_{\text{конф.}L}$ на тертя по його довжині і втрати $h_{\text{конф.}\alpha}$, пов'язаної зі звуженням труби:

$$h_{\text{конф.}} = h_{\text{конф.}L} + h_{\text{конф.}\alpha} \quad (28)$$

Втрата напору по довжині конфузору визначається за формулою

$$h_{\text{конф.}L} = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{d_2^4}{d_1^4} \right) \frac{V_2^2}{2g} \quad (29)$$

Втрата напору при звуженні стає відчутною при куті закриття $\alpha > 50^\circ$, величина якого розраховується за формулою.

$$\alpha = 2\arcsin\left(\frac{d_1 - d_2}{2L_{\text{конф.}}}\right) \quad (30)$$

Величина такої втрати може бути знайдена за формулою

$$h_{\text{конф.}\alpha} = K_{\text{ном}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (31)$$

Величину коефіцієнта пом'якшення $K_{\text{ном}}$ можна визначити за рівнянням:

$$K_{\text{ном}} = 0,0825 + 1,71 \cdot 10^{-3} \alpha + 1,2 \cdot 10^{-5} \alpha^2 + 5,3 \cdot 10^{-8} \alpha^3 \quad (32)$$

У такий спосіб сумарні втрати напору в конфузорі можна визначити виразом (12), де:

$$\zeta_{\text{конф}} = K_{\text{ном}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 + \frac{\lambda_{\text{сп}}}{8 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left(1 - \frac{d_2^4}{d_1^4}\right) \quad (33)$$

1.2.2.5. Зміна напрямку потоку

1.2.2.5.1. Різкий поворот трубопроводу (просте або гостре коліно)

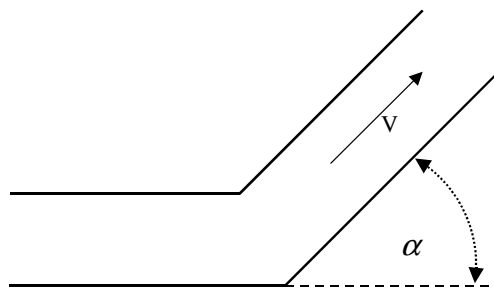


Рис.6 – Поворот трубопроводу з гострим коліном

Втрату напору на гострому коліні можна розрахувати за рівнянням (12), в якому коефіцієнт місцевого опору визначається за формулою

$$\zeta_{\text{г.к.}} = 1 - \cos(\alpha) \quad (34)$$

1.2.2.5.2. Плавний поворот труби (закруглене коліно або відвід)

Втрати напору при плавному повороті труби круглого перетину на кут $\alpha = 90^\circ$ можна визначити за рівнянням (12), в якому коефіцієнт місцевого опору обчислюється за формулою

$$\zeta_{\text{з.к.}90^\circ} = \left[0,2 + 0,001 \cdot (100\lambda)^8\right] \sqrt{\frac{d}{r}}, \quad (35)$$

де r - радіус заокруглення, м.

Якщо $\alpha > 90^\circ$, то:

$$\zeta_{\text{з.к.}} = a \zeta_{\text{з.к.}90^\circ}, \quad (36)$$

де a визначають за таблицями [1]. У випадку, коли $\alpha \leq 90^\circ$ (рис.7), то можна вважати

$$a \approx \sin(\alpha) \quad (37)$$

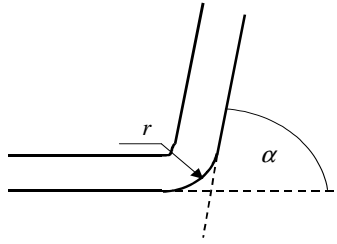


Рис. 7 – Геометричні параметри заокругленого коліна

2. Послідовність виконання роботи

2.1. Визначення вихідних даних

Для наведеного в завданні виду рідини і її температури визначається питома вага рідини за довідниками (наприклад, [1]). Питому вагу (н/м³) і кінематичну в'язкість (м²/с) води в залежності від її температури t° за Цельсієм можна визначити з рівнянь:

$$\gamma = 9809,1 + 0,4972t - 0,07167t^2 + 3,67 \cdot 10^{-4}t^3 - 1,05 \cdot 10^{-6}t^4 ; \quad (38)$$

$$\nu = (177,2 - 5,3931t + 0,09503t^2 - 8,66 \cdot 10^{-4}t^3 + 3,06 \cdot 10^{-6}t^4) \cdot 10^{-8} . \quad (39)$$

Еквівалентну шорсткість стінок трубопроводу знаходять для наведеного у завданні матеріалу, з якого він виготовлений, та тривалості його експлуатації за довідниками (наприклад, [1]). Якщо для заданих характеристик трубопроводу в довіднику наводиться діапазон величин еквівалентної шорсткості, в розрахунку можна використовувати будь-яке значення з цього діапазону.

2.2. Визначення розрахункових перерізів і залежностей

Розрахункові перерізи у потоці рідини вибираються довільно, проте таким чином, щоб із складових, що входять у рівняння Бернуллі (5), тільки один доданок був невідомий. Як розрахункові перерізи пропонується вибирати поверхню рідини в резервуарі або кінцевий переріз останньої ділянки трубопроводу у випадку, коли рідина з трубопроводу витікає в атмосферу. Горизонтальну площину порівняння доцільно проводити через горизонтальну вісь найнижчого коліна (ділянки) трубопроводу.

Після вибору розрахункових перерізів визначають розрахункові залежності перетворенням рівняння Бернуллі відповідно до вимоги завдання.

2.3. Визначення лінійних втрат напору в трубопроводі

2.3.1. Для кожної ділянки трубопроводу з постійним діаметром труби d_i визначають:

- середню за перерізом швидкість течії V_i за формулами (1, 3);
- величину коефіцієнта гідравлічного тертя λ_i за формулою (10);
- величину лінійних втрат h_{L_i} за формулою (9);
-

2.3.2. Визначають сумарні лінійні втрати напору в трубопроводі як суму лінійних втрат на окремих ділянках трубопроводу:

$$h_L = \sum_i h_{L_i} \quad (40)$$

2.4. Визначення місцевих втрат напору

2.4.1. Встановлюють джерела місцевих втрат напору.

До них відносяться:

1. ділянки різкої зміни площі живого перерізу потоку:
 - 1.1. раптове розширення потоку;
 - 1.2. раптове звуження потоку;
 - 1.3. вхід у трубопровід із резервуара;
 - 1.4. витікання з труби в резервуар;
2. ділянки зміни напрямку потоку:
 - 2.1. гостре коліно;
 - 2.2. заокруглене коліно;
3. ділянки поступової зміни площі живого перерізу:
 - 3.1. дифузор;
 - 3.2. конфузор.

2.4.2. Для ділянки витікання рідини з труби в резервуар визначають величину місцевих втрат напору за формулою (15).

Для інших ділянок з раптовою зміною площі живого перерізу потоку величини місцевих втрат напору знаходять за формулою (12), в якій величина коефіцієнта місцевих опорів ζ визначається за формулами (14, 16 – 18), або (19) залежно від виду місцевого опору.

2.4.3. Для гострого коліна проводиться розрахунок місцевої втрати напору за формулами (12, 34). Для заокругленого коліна розрахунок місцевої втрати напору виконують за формулами (12), (35 - 37).

2.4.4. Для дифузора і конфузора визначають:

1. швидкість потоку в початковому і кінцевому перерізі за формулами (1, 3);
2. коефіцієнти гідравлічного опору в початковому і кінцевому перерізах за формулою (10);
3. середню величину коефіцієнта гідравлічного тертя за рівнянням (26), де λ_1 , λ_2 - величини коефіцієнта гідравлічного тертя відповідно в початковому і кінцевому перетинах дифузора або конфузора;

4. кут α (розкриття дифузора або закриття конфузора) визначається за формулами (21), (30).
5. знаходять величину коефіцієнта пом'якшення $K_{ном}$ за формулою (23) для дифузора або за формулою (32) для конфузора;
6. визначають місцеві втрати напору за формулами (12) і (27) або (33).

2.5. Визначення сумарних втрат напору в трубопроводі

Сумарні втрати напору в трубопроводі визначають за формулою (6).

2.6. Вирішення рівняння Бернуллі

Після того, як усі складові рівняння Бернуллі, окрім одної невідомої, стали визначеними, розраховують значення невідомої величини.

2.7. Визначення втрати тиску в трубопроводі

Втрати тиску в трубопроводі розраховують за формулою

$$\Delta P = \gamma \sum h_{1-2} . \quad (41)$$

2.8. Побудова напірної та п'єзометричної лінії

Побудову ліній ведуть по перерізам, де виникають місцеві втрати опору. Побудову доцільно виконувати в послідовності від початкового перерізу до кінцевого. Спочатку будують напірну лінію. П'єзометричну лінію будують по напірній лінії. Висота п'єзометричної лінії в кожному живому перерізі потоку визначається шляхом віднімання з висоти напірної лінії величини $\alpha V^2 / 2g$, де V - середня швидкість потоку в живому перерізі .

3. Приклад розрахунку

Завдання на виконання розрахунково-графічної роботи

Варіант № XX

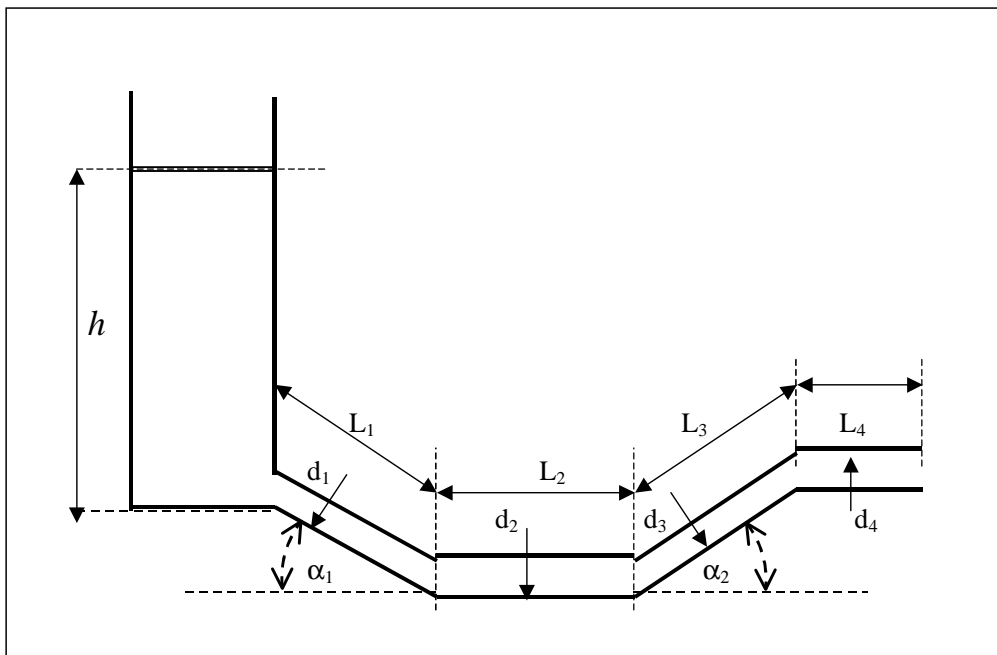


Рис. 1 – Конфігурація трубопроводу

Параметри ділянок трубопроводу

№ ділянки, i	Вид трубопроводу	Li, м	di, мм
1	кругла труба	5	150
2	кругла труба	300	250
3	кругла труба	20	200
4	кругла труба	2	100

Визначити рівень води в резервуарі, втрати тиску в трубопроводі і побудувати напірну і п'єзометричну лінії, якщо: $\alpha_1=60^\circ$; $\alpha_2=30^\circ$; $P_a=1$ атм. Рідина – вода при температурі $t=25^\circ\text{C}$. Матеріал трубопроводу – оцинковані сталеві труби, що були в експлуатації. Витрата рідини $Q=30$ л/с.

РОЗРАХУНОК

I. *Визначення питомої ваги рідини*

Питому вагу води при температурі 25°C розраховуємо за формулою (38):

$$\gamma = 9809,1 + 0,4972t - 0,07167t_2 + 3,67 \cdot 10^{-4}t_3 - 1,05 \cdot 10^{-6}t_4 = 9782 \text{ Н/м}^3$$

II. *Визначення коефіцієнта кінематичної в'язкості рідини*

Кінематичну в'язкість води при температурі 20°C розраховуємо за формулою (39):

$$\nu = (177,2 - 5,3931t + 0,09503t_2 - 8,66 \cdot 10^{-4}t_3 + 3,06 \cdot 10^{-6}t_4) \cdot 10^{-8} = 89,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

III. *Визначення еквівалентної шорсткості труб*

За таблицею 4.1 довідника [1] еквівалентна шорсткість оцинкованих труб, що були в експлуатації, дорівнює

$$\Delta_e = 0,18 \text{ мм}.$$

IV. *Вибір горизонтальної площини відліку і розрахункових перерізів*

Горизонтальну площину $O-O'$ відліку висот перерізів потоку обираємо на рівні його найнижчої ділянки. Початковий переріз потоку 0-0 обираємо на рівні вільної поверхні рідини в резервуарі, а кінцевий переріз 5-5 - на витоку води з трубопроводу.

За даними, наведеними у таблиці, встановлюємо місця, де виникають місцеві втрати напору, і обираємо там розташування проміжних перерізів, а саме:

- вхід води з резервуара в трубопровід (переріз 1-1);
- перше гостре коліно і раптове розширення потоку (переріз 2-2);
- друге гостре коліно і перше раптове звуження потоку (переріз 3-3);
- третє гостре коліно і друге раптове звуження потоку (переріз 4-4).

V. *Складання рівняння Бернуллі*

Для початкового 0-0 і кінцевого 5-5 перерізів потоку величини, що входять до рівняння Бернуллі, є:
переріз 0-0:

$$z_0 = h + l_1 = h + L_1 \sin(\alpha_1); P_0 = P_a; V = V_0 = 0;$$

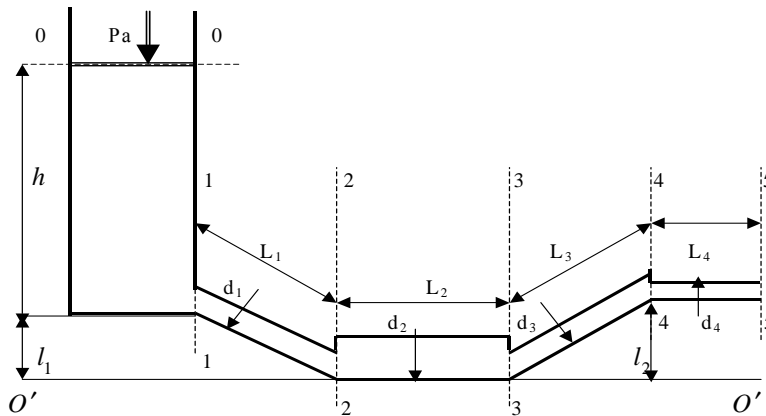


Рис. 2 – Розташування горизонтальної площини відліку висот і розрахункових перерізів потоку

переріз 5-5:

$$z_5 = l_2 = L_3 \sin(\alpha_2); \quad P_5 = Pa; \quad V = V_4,$$

де V_4 є швидкість течії на ділянці трубопроводу 4-5.

Вважається, що швидкістю течії в резервуарі можна знехтувати у порівнянні зі швидкостями течії в трубопроводі.

У такий спосіб рівняння Бернуллі (5) набуває вигляду

$$h + L_1 \sin(\alpha_1) = L_3 \sin(\alpha_2) + \frac{\alpha V_4^2}{2g} + \sum h_{0-5}$$

З цього рівняння отримуємо залежність для розрахунку рівня води в резервуарі (оскільки трубопровід складений з круглих труб, приймаємо $\alpha=1$):

$$h = L_3 \sin(\alpha_2) - L_1 \sin(\alpha_1) + \frac{V_4^2}{2g} + \sum h_{0-5}$$

VI. Визначення лінійних втрат напору

Втрати напору за довжиною потоку відбуваються на чотирьох ділянках трубопроводу, які є круглими трубами з постійними діаметрами.

Ділянка 0-1: Втрат напору не відбувається, оскільки швидкістю руху рідини в резервуарі знехтувано.

Ділянка 1-2:

Швидкість потоку:

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{3,1416 \cdot (150 \cdot 10^{-3})^2} = 1,698 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{d_1} = \frac{V_1 d_1}{\nu} = \frac{1,698 \cdot 0,15}{89,4 \cdot 10^{-8}} = 284900.$$

Коефіцієнт Дарсі:

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{d_1}} + \frac{A_e}{d_1} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{284900} + \frac{0,18 \cdot 10^{-3}}{0,15} \right)^{0,25} = 0,02142.$$

Втрата напору:

$$h_{L_1} = \frac{\lambda_1}{d_1} \frac{V_1^2}{2g} L_1 = \frac{0,02142 \cdot 1,698^2}{0,15 \cdot 2 \cdot 9,81} \cdot 5 = 0,1049 \text{ м.}$$

Ділянка 2-3:

Швидкість потоку:

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{3,1416 \cdot (250 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6112 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{d_2} = \frac{V_2 d_2}{\nu} = \frac{0,6112 \cdot 0,25}{89,4 \cdot 10^{-8}} = 170900.$$

Коефіцієнт Дарсі:

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{d_2}} + \frac{A_e}{d_2} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{170900} + \frac{0,18 \cdot 10^{-3}}{0,25} \right)^{0,25} = 0,02011.$$

Втрата напору:

$$h_{L_2} = \frac{\lambda_2}{d_2} \frac{V_2^2}{2g} L_2 = \frac{0,02011 \cdot 0,6112^2}{0,25 \cdot 2 \cdot 9,81} \cdot 300 = 0,4595 \text{ м.}$$

Ділянка 3-4:

Швидкість потоку:

$$V_3 = \frac{4Q}{\pi d_3^2} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{3,1416 \cdot (200 \cdot 10^{-3})^2} = 0,9549 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{d_3} = \frac{V_3 d_3}{\nu} = \frac{0,9549 \cdot 0,2}{89,4 \cdot 10^{-8}} = 213600.$$

Коефіцієнт Дарсі:

$$\lambda_3 = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{d_3}} + \frac{A_e}{d_3} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{213600} + \frac{0,18 \cdot 10^{-3}}{0,2} \right)^{0,25} = 0,02055.$$

Втрата напору:

$$h_{L_3} = \frac{\lambda_3}{d_3} \frac{V_3^2}{2g} L_3 = \frac{0,02055 \cdot 0,9549^2}{0,2 \cdot 2 \cdot 9,81} \cdot 20 = 0,09551 \text{ м.}$$

Ділянка 4-5:

Швидкість потоку:

$$V_4 = \frac{4Q}{\pi d_4^2} = \frac{4 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{3,1416 \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2} = 3,820 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{d_4} = \frac{V_4 d_4}{\nu} = \frac{3,82 \cdot 0,1}{89,4 \cdot 10^{-8}} = 427300.$$

Коефіцієнт Дарсі:

$$\lambda_4 = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}_{d_4}} + \frac{\Delta_e}{d_4} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{68}{427300} + \frac{0,18 \cdot 10^{-3}}{0,1} \right)^{0,25} = 0,02314.$$

Втрата напору:

$$h_{L_4} = \frac{\lambda_4}{d_4} \frac{V_4^2}{2g} L_4 = \frac{0,02314 \cdot 3,82^2}{0,1 \cdot 2 \cdot 9,81} \cdot 2 = 0,3442 \text{ м.}$$

Лінійні втрати напору дорівнюють:

$$h_L = h_{L_1} + h_{L_2} + h_{L_3} + h_{L_4} = 0,1049 + 0,4595 + 0,09551 + 0,3442 = 1,004 \text{ м.}$$

VII. Визначення місцевих втрат напору

Джерелами місцевих втрат напору є (рис. 2):

1. Вхід з резервуара до труби (ділянка I);
2. Гостре коліно (ділянка II);
3. Гостре коліно (ділянка III);
4. Гостре коліно (ділянка IV);
5. Раптове розширення трубопроводу (ділянка II);
6. Раптове звуження трубопроводу (ділянка III);
7. Раптове звуження трубопроводу (ділянка IV).

1) Розрахунок місцевої втрати напору на вході з резервуара в трубопровід:

$$h_{\text{вх.}} = \zeta_{\text{вх.}} \frac{V_1^2}{2g} = 0,5 \frac{1,698^2}{2 \cdot 9,81} = 0,07348 \text{ м.}$$

2) Розрахунок місцевої втрати напору в першому гострому коліні (переріз 2-2):

$$\zeta_{1_{\text{г.к.}}} = 1 - \cos(\alpha_1) = 1 - \cos(60^\circ) = 0,5;$$

$$h_{1_{\text{г.к.}}} = \zeta_{1_{\text{г.к.}}} \frac{V_2^2}{2g} = 0,5 \cdot \frac{0,6112^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00952 \text{ м.}$$

3) Розрахунок місцевої втрати напору в другому гострому коліні (переріз 3-3):

$$\zeta_{2_{\text{г.к.}}} = 1 - \cos(\alpha_2) = 1 - \cos(30^\circ) = 0,134;$$

$$h_{2_{\text{г.к.}}} = \zeta_{2_{\text{г.к.}}} \frac{V_3^2}{2g} = 0,134 \cdot \frac{0,9549^2}{2 \cdot 9,81} = 0,006228 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору в третьому гострому коліні (переріз 4-4):

$$\zeta_{3_{\text{г.к.}}} = 1 - \cos(\alpha_2) = 1 - \cos(30^\circ) = 0,134;$$

$$h_{3_{\text{г.к.}}} = \zeta_{3_{\text{г.к.}}} \frac{V_4^2}{2g} = 0,134 \cdot \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} = 0,09966 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору в раптовому розширенні трубопроводу (переріз 2-2):

$$\zeta_{\text{р.р.}} = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1 \right)^2 = 3,160;$$

$$h_{\text{р.р.}} = \zeta_{\text{р.р.}} \frac{V_2^2}{2g} = 3,16 \cdot \frac{0,6112^2}{2 \cdot 9,81} = 0,06018 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору в першому раптовому звуженні трубопроводу (переріз 3-3):

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \left(\frac{d_3}{d_2}\right)^2} = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \left(\frac{0,2}{0,25}\right)^2} = 0,6635;$$

$$\zeta_{p.з.} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 = \left(\frac{1}{0,6635} - 1\right)^2 = 0,2572;$$

$$h_{l_{p.з.}} = \zeta_{p.з.} \frac{V_3^2}{2g} = 0,2572 \frac{0,9549^2}{2 \cdot 9,81} = 0,01195 \text{ м.}$$

Розрахунок місцевої втрати напору в другому раптовому звуженні трубопроводу (переріз 4-4):

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \left(\frac{d_4}{d_3}\right)^2} = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - \left(\frac{0,1}{0,2}\right)^2} = 0,6206;$$

$$\zeta_{p.з.} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2 = \left(\frac{1}{0,6206} - 1\right)^2 = 0,3737;$$

$$h_{2_{p.з.}} = \zeta_{p.з.} \frac{V_4^2}{2g} = 0,3737 \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} = 0,2779 \text{ м.}$$

8) Визначення суми місцевих втрат напору:

$$\sum h_M = 0,07348 + 0,00952 + 0,006228 + 0,09966 + 0,06018 + 0,01195 + 0,2779 = 0,5389 \text{ м.}$$

VIII. Визначення сумарної втрати напору:

$$\sum h_{0-5} = \sum h_M + h_L = 0,5389 + 1,004 = 1,543 \text{ м.}$$

IX. Визначення рівня води в резервуарі:

$$h = L_3 \sin(\alpha_2) - L_1 \sin(\alpha_1) + \frac{V_4^2}{2g} + \sum h_{0-5} = 10 - 4,33 + 0,744 + 1,543 = 7,957 \text{ м } \approx 7,96 \text{ м.}$$

X. Визначення втрати тиску в трубопроводі:

$$\Delta P = \gamma \Delta h_w = 9782 \cdot 1,543 = 15090 \text{ Па.}$$

XI. Побудова напірної лінії

Висоту напірної лінії знаходимо як

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

На ділянці 0-1 (початок $x=0$ м; кінець $x=h=7,96$ м):

$$z = h + L_1 \sin(\alpha_1) = 7,96 + 4,33 = 12,29 \text{ м;}$$

$$p = Pa = 1 \text{ атм} = 101417 \text{ Па; } V = 0 \text{ м/с.}$$

$$H_{0-1} = z + \frac{Pa}{\gamma} = 22,66 \text{ м}$$

В перерізі 1-1 ($x=7,96$ м): відбувається місцева втрата напору на вході з

резервуара в трубопровод. Тому висота напірної лінії стрибком знижується на величину h_{ex} :

$$H_1 = H_{0-1} - h_{ex} = 22,66 - 0,07348 = 22,59 \text{ м.}$$

На ділянці 1-2 (початок $x=h=7,96$ м; кінець $x=7,96+L1=13$ м): відбуваються лінійні втрати напору. Тому висота напірної лінії лінійно знижується на величину h_{L1} до позначки:

$$H_{1-2} = H_1 - h_{L1} = 22,59 - 0,1049 = 22,49 \text{ м.}$$

В перерізі 2-2 ($x=13$ м): відбувається місцева втрата напору на першому гострому коліні та раптове розширення трубопроводу. Тому висота напірної лінії стрибком зменшується на величину $hl_{z.k.}$ і $h_{p.p.}$:

$$H_2 = H_{1-2} - hl_{z.k.} - h_{p.p.} = 22,49 - 0,00952 - 0,06018 = 22,42 \text{ м.}$$

На ділянці 2-3 (початок $x=13$ м; кінець $x=13+L2=313$ м): відбуваються лінійні втрати напору. На цій ділянці висота напірної лінії лінійно знижується на величину h_{L2} :

$$H_{2-3} = H_2 - h_{L2} = 22,42 - 0,4549 = 21,97 \text{ м.}$$

В перерізі 3-3 ($x=313$ м): відбувається місцева втрата напору на другому гострому коліні та перше раптове звуження трубопроводу. Тому висота напірної лінії стрибком знижується на величину $h2_{z.k.}$ і $hl_{p.z.}$:

$$H_3 = H_{2-3} - h2_{z.k.} - hl_{p.z.} = 21,97 - 0,006228 - 0,01195 = 21,95 \text{ м.}$$

На ділянці 3-4 (початок $x=313$ м; кінець $x=313+L3=333$ м): відбуваються лінійні втрати напору. На цій ділянці висота напірної лінії лінійно знижується на величину h_{L3} :

$$H_{3-4} = H_3 - h_{L3} = 21,95 - 0,09551 = 21,85 \text{ м.}$$

В перерізі 4-4 ($x=333$ м): відбувається місцева втрата напору на третьому гострому коліні та друге раптове звуження трубопроводу. Тому висота напірної лінії стрибком знижується на величину $h3_{z.k.}$ і $h2_{p.z.}$:

$$H_4 = H_{3-4} - h3_{z.k.} - h2_{p.z.} = 21,85 - 0,09966 - 0,2779 = 21,47 \text{ м.}$$

На ділянці 4-5 (початок $x=333$ м; кінець $x=333+L4=335$ м): відбуваються лінійні втрати напору. На цій ділянці висота напірної лінії лінійно знижується на величину h_{L4} :

$$H_{4-5} = H_4 - h_{L4} = 21,47 - 0,3442 = 21,13 \text{ м.}$$

XII. Розрахунок висоти п'єзометричної лінії.

П'єзометричний напір у будь-якому перерізі трубопроводу менше повного напору на величину $\alpha V^2 / 2g$. Тому висота п'єзометричної лінії може бути визначена відніманням величини швидкісного напору від висоти напірної лінії:

$$H = H - \frac{\alpha V^2}{2g}$$

Ділянка 0-1:

$$V \approx 0.$$

Тому п'езометрична лінія збігається з напірною.

$$H_{0-1} = H_{0-1} = 22,66 \text{ м.}$$

Переріз 1-1:

$$V = V_1 = 1,698 \text{ м/с.}$$

$$H_1 = H_1 - \frac{\alpha V_1^2}{2g} = 22,59 - \frac{1,698^2}{2 \cdot 9,81} = 22,44 \text{ м.}$$

Ділянка 1-2:

У трубі постійного перерізу швидкість по довжині труби не змінюється і дорівнює $V_1 = 1,698$ м/с. Тому відстань між напірною і п'езометричною лініями постійна. Отже, п'езометрична лінія паралельна напірній і плавно знижується до позначки

$$H_{1-2} = H_{1-2} - \frac{\alpha V_1^2}{2g} = 22,49 - \frac{1,698^2}{2 \cdot 9,81} = 22,34 \text{ м.}$$

Переріз 2-2:

$$V = V_2 = 0,6112 \text{ м/с.}$$

$$H_2 = H_2 - \frac{\alpha V_2^2}{2g} = 22,42 - \frac{0,6112^2}{2 \cdot 9,81} = 22,4 \text{ м.}$$

Ділянка 2-3:

Швидкість течії по довжині труби не змінюється і дорівнює $V_2 = 0,6112$ м/с. Тому відстань між напірною і п'езометричною лініями постійна. Отже, п'езометрична лінія паралельна напірній і плавно знижується до позначки

$$H_{2-3} = H_{2-3} - \frac{\alpha V_2^2}{2g} = 21,97 - \frac{0,6112^2}{2 \cdot 9,81} = 21,95 \text{ м.}$$

Переріз 3-3:

$$V = V_3 = 0,9549 \text{ м/с}$$

$$H_3 = H_3 - \frac{\alpha V_3^2}{2g} = 21,95 - \frac{0,9549^2}{2 \cdot 9,81} = 21,9 \text{ м.}$$

Ділянка 3-4:

Швидкість течії по довжині труби не змінюється і дорівнює

$$V_3 = 0,9549 \text{ м/с.}$$

Тому відстань між напірною і п'езометричною лініями постійна; п'езометрична лінія паралельна напірній і плавно знижується до позначки

$$H_{3-4} = H_{3-4} - \frac{\alpha V_3^2}{2g} = 21,85 - \frac{0,9549^2}{2 \cdot 9,81} = 21,8 \text{ м.}$$

Переріз 4-4:

$$V = V_4 = 3,82 \text{ м/с}$$

$$H_4 = H_4 - \frac{\alpha V_4^2}{2g} = 21,47 - \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} = 20,73 \text{ м.}$$

Ділянка 4-5:

Швидкість течії по довжині труби не змінюється і дорівнює

$$V_4 = 3,82 \text{ м/с.}$$

Відстань між напірною і п'єзометричною лініями постійна; п'єзометрична лінія рівнобіжна напірній і плавно знижується до позначки

$$P_{4-5} = H_{4-5} - \frac{\alpha V_4^2}{2g} = 21,13 - \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} = 20,39 \text{ м.}$$

XIII. По закінченні розрахунків слід накреслити графіки напірної і п'єзометричної ліній (рис. 3) на аркуші міліметрового паперу формату А3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Справочник по гидравлике/ Под ред. В.А. Большакова – Л.: Вища школа., 1984. – 343 с.
2. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

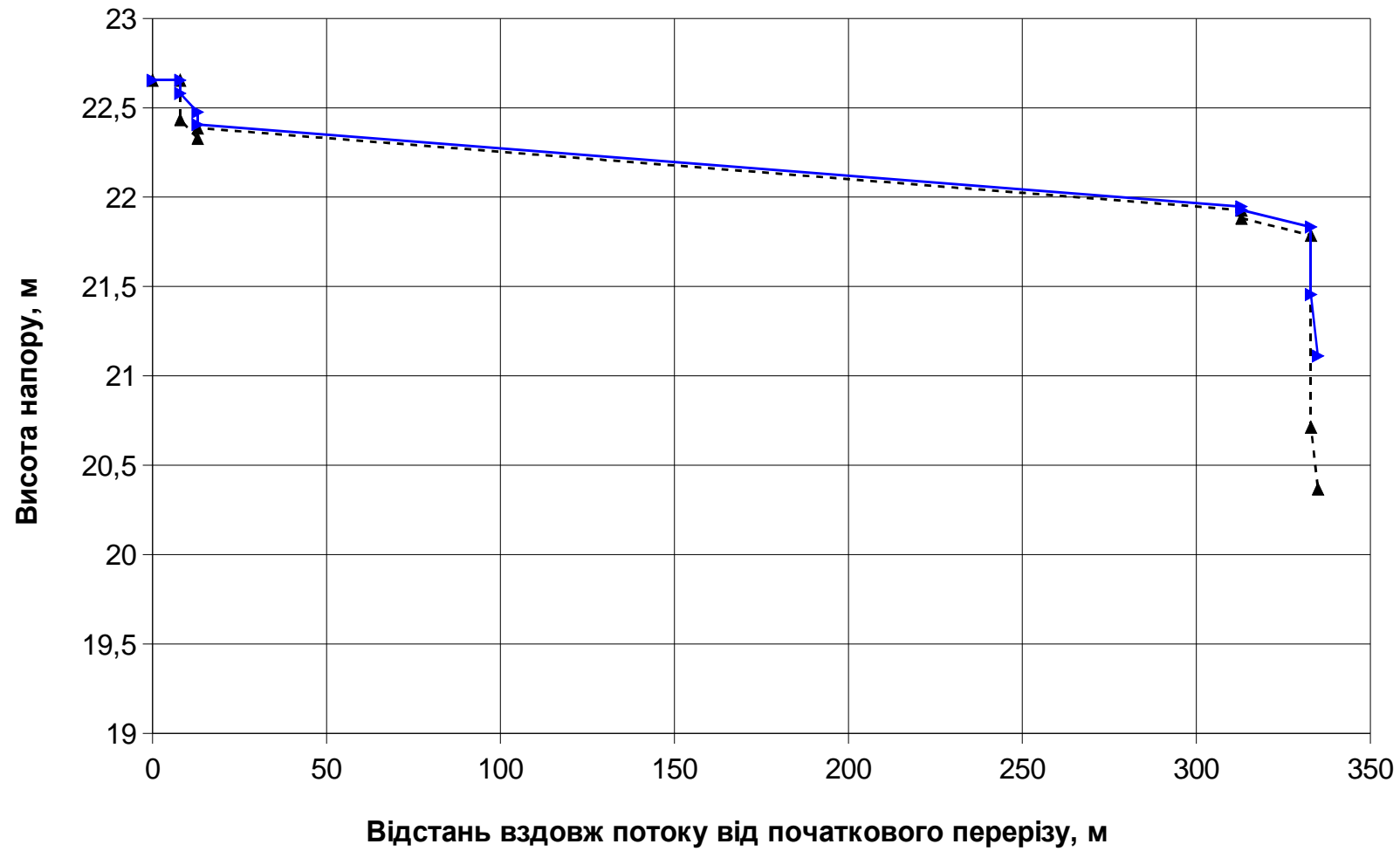


Рис. 3 – Графік напірної (суцільна) і п'єзометричної (пунктирна) лінії

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічного завдання з дисципліни “Прикладна механіка рідин і газів” (для студентів 2 курсу денної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр напряму підготовки 6.040106 - “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”)

Укладач: **Бараннік** Валерій Олександрович

Відповідальний за випуск *В. О. Бараннік*

Редактор *О. В. Тарасюк*

Комп’ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2010, поз. 68М

Підп. до друку 04.11.2010

Друк на різнографі

Зам. №

Формат 60x84/16.

Ум.-друк. арк. 1,3.

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.