

Лекція 7. Гідравлічний розрахунок тупикових водопровідних мереж

План

1. Принципи гідравлічного розрахунку тупикових водопровідних мереж.
2. Розрахунок простого відгалуження.
3. Техніко-економічний розрахунок тупикової магістралі.
4. Поняття про «граничні» витрати і швидкості.
5. Техніко-економічний розрахунок складного відгалуження тупикової мережі.

В розгалуженій (тупиковій) мережі при умові живлення її з одного кінця вода може бути подана до кожної водорозбірної точки лише з однієї сторони. Розглянемо розгалужену або тупикову мережу (рис.9.1).

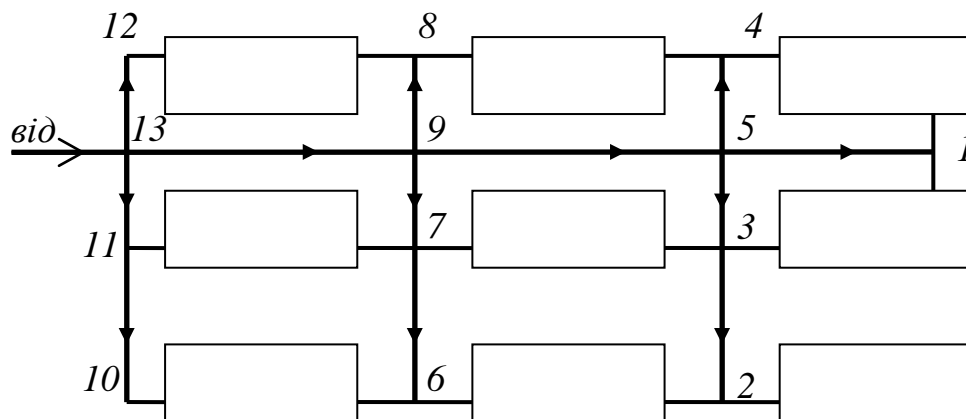


Рисунок 7.1 – Розгалужена мережа населеного пункту

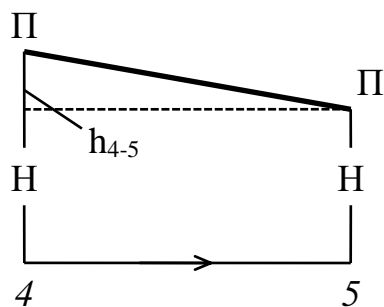
Напрямок руху води в тупиковій мережі показано стрілками. При розрахунку такої мережі зустрічаються 3 типи задач:

- розрахунок простого відгалуження, у якого відомі вільні напори на початку і в кінці відгалуження; а відбору води між цими вузлами немає;

- розрахунок головної магістралі, у якої вільний напір відомий тільки в кінцевій точці;
- розрахунок складного відгалуження, у якого відомі вільні напори на початку і в кінці відгалуження, а в проміжних вузлах напори не відомі.

До початку розрахунків при відомій кількості поверхів в будинках, які одержують воду з кінцевих вузлів, потрібні вільні напори в них будуть відомими. Вільні напори на початку кожного з відгалужень стануть відомими після розрахунку головної магістралі.

Найбільш простим являється перший тип задачі. Якщо відомі вільні напори на кінцях ділянки, тоді відомі і **втрати напору** на ній. Розглянемо п'єзометричну лінію простого відгалуження (рис.9.2).



$$h_{4-5} = \Pi_4 - \Pi_5 = H_4 - H_5 + Z_4 - Z_5$$

Рисунок 9.2 - П'єзометрична лінія для ділянки 4-5

Суть задачі полягає в тому, щоб визначити такий найменший діаметр, при якому втрати на ділянці не перевищать допустимих h_{4-5} .

З другої сторони

$$h = s_0 \times l \times Q^2 = i \times l$$

Тоді, якщо користуватися таблицею питомого опору, який залежить від діаметру, необхідно знайти величину допустимого S_0 .

$$s_0 = h / (l \times Q^2)$$

По знайденому s_0 і відповідних таблицях знаходимо діаметр трубопроводу D .

Якщо користуватися таблицями Ф.А. Шевельова [15], спочатку знаходимо питомі втрати напору i .

$$i = h / l$$

а потім по таблицях знаходимо відповідний діаметр.

Значно складніше розрахувати головну магістраль. При відомому вільному напорі тільки в кінцевій точці H_1 вільний напір в початковій точці буде визначатися тими діаметрами, які будуть на кожній ділянці (рис.9.3).

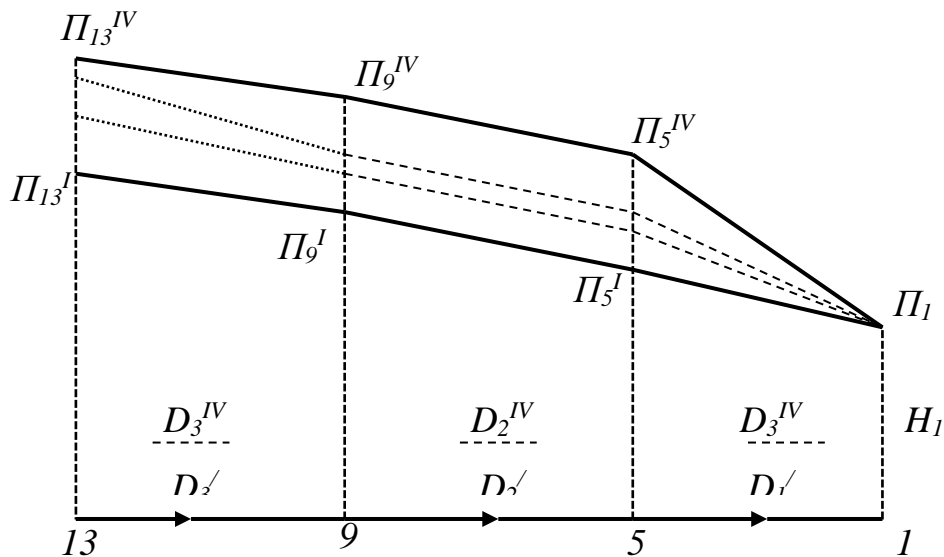


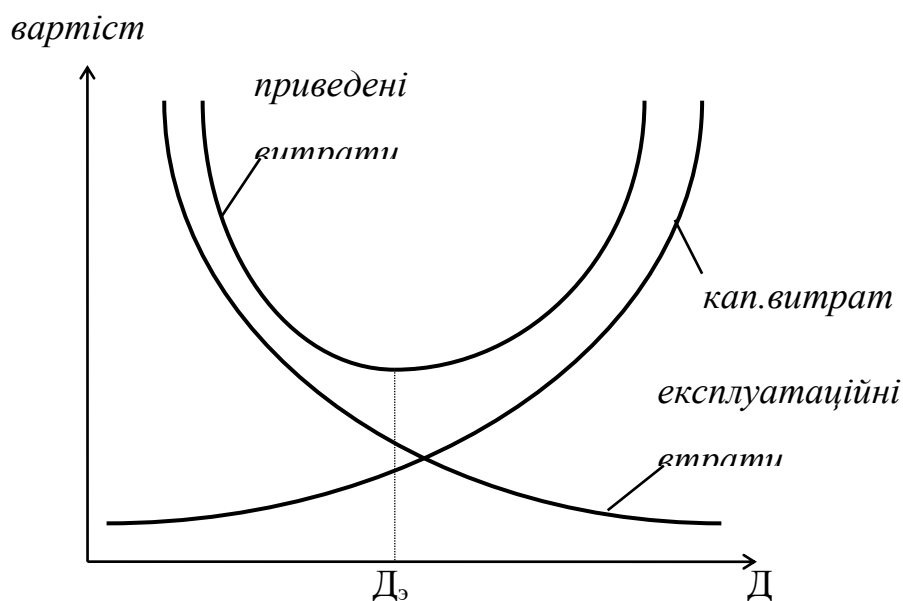
Рисунок 7.3 – Можливі п'езометричні лінії на головній магістралі

Але по витратам коштів всі розглянуті варіанти будуть не однаковими. Дійсно, якщо прийняти на всіх ділянках великі діаметри, то капітальні вкладення будуть теж великими, але за рахунок малих втрат

напору експлуатаційні витрати будуть малими і навпаки. Графічно це можна зобразити так (рис.9.4).

Якщо одночасно враховувати капітальні і експлуатаційні витрати, то можна побудувати третій графік - **графік приведених витрат**.

Останній графік має мінімум, який буде відповідати найбільш



економічному рішення.

Рисунок 7.4 – Графік залежності витрат від D для мереж

Таким чином, шлях до розрахунку головної магістралі повинен бути таким:

- вивести рівняння для функції приведених затрат з врахуванням діаметрів всіх ділянок магістралі;
- дослідити це рівняння на екстремум;
- визначити економічні діаметри для всіх ділянок.

Позначимо через C_b будівельну вартість ділянок, а через $C_{ек}$ величину щорічних витрат на їх експлуатацію. Розрахунковий термін окупності, тобто термін впродовж якого економія на експлуатаційних витратах по одному

варіанту компенсує зайві капіталовкладення, тобто витрати на будівництво, по другому варіанту. Самим вигідним з можливих варіантів за величиною загальних витрат буде той, для якого величина:

$$C_{\delta} + tC_{ек}$$

буде мінімальною (при повній технічній рівнозначності зрівнювальних варіантів). Повна величина витрат, яка віднесена до одного року розрахункового терміну t , може бути подана в вигляді:

$$W = \frac{1}{t} C_{\delta} + C_{ек} = EC_{\delta} + C_{ек},$$

де E – коефіцієнт порівнювальної ефективності.

Витрати на експлуатацію впродовж року включають 2 основних вида витрат:

- витрати на поточний ремонт $C_{п.р}$,
- витрати на електроенергію $C_{ел}$.

$$C_{ек} = C_{п.р.} + C_{ел}.$$

Витрати на поточний ремонт визначаються за формулою,

$$C_{п.р.} = pC_{\delta},$$

де p – відсотки на поточний ремонт від будівельної вартості.

Тоді

$$W = 1/t C_{\delta} + pC_{\delta} + C_{ел} = (1/t + p)C_{\delta} + C_{ел}.$$

Позначивши $1/t = E$ і виражаючи E і p в відсотках, одержимо

$$W = 0,01(E + p)C_{\delta} + C_{ел}. \quad (2)$$

Економічному варіанту буде задовольняти варіант, для якого W буде мінімальною. Щоб знайти економічний діаметр, необхідно приведену вартість W виразити як функцію діаметру. Будівельну вартість ділянки водопроводу можна представити у вигляді

$$C_{\delta} = C_{\text{вод}} + C_{\text{н}},$$

де $C_{\text{вод}}$ – будівельна вартість водоводу,

$C_{\text{н}}$ – будівельна вартість насосної станції.

Будівельна вартість водоводу буде:

$$C_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n (a + bD_i^{\alpha}) \times l_i$$

де n - кількість ділянок,

a, b - коефіцієнти, які визначають вартість 1 м водопроводу,

D_i, l_i - діаметр і довжина ділянки відповідно.

Будівельну вартість насосної станції можна визначити за формулою:

$$C_{\text{н}} = fN_0 = frN,$$

де f - вартість насосної станції, яка приходить на 1 кВт встановленої потужності,

N_0 – встановлена потужність (потужність діючих і резервних агрегатів), кВт,

r – коефіцієнт запасу насосного устаткування:

$$r = N_0/N.$$

Тоді

$$C_{\delta} = \sum_{i=1}^n (a + bD_i^{\alpha}) \times l_i + frN.$$

Величина $C_{\text{ел}}$ включає в основному витрати на електроенергію. Сюди також входять витрати на заробітну плату експлуатаційного штату, але їх можна не враховувати, бо вони мало залежать від діаметру ділянки.

$$C_{\text{ел}} = \gamma NT\sigma_1 + rN\sigma_2,$$

де σ_1 і σ_2 – вартість 1кВт-год використаної електроенергії і 1кВА встановленої потужності відповідно;

T – кількість годин роботи устаткування за рік

$$T = 24 \times 365 = 8760 \text{ годин.}$$

Якщо вартість 1кВт-год і 1кВА виражати в коп., одержимо

$$C_{\text{ел}} = 0,01(8760\gamma NT\sigma_1 + rN\sigma_2).$$

Підставивши одержані залежності в формулу (2), одержимо

$$W = 0,01[(E+p) \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) \times l_i + (E+p') frN + 8760\gamma N\sigma_1 + rN\sigma_2],$$

де p' - відсоток відрахувань на поточний ремонт насосної станції;

γ - коефіцієнт, який характеризує нерівномірність витрачання енергії на підйом води.

Потужність, необхідна для перекачування води, рівна:

$$N = \frac{QH}{102\eta} = \frac{QH\rho g}{1000\eta},$$

де Q – витрата в л/с – для 1 вигляду формули або в м³/с – для 2 (в одиницях СІ);

H – напір в м;

η - к.к.д. насосної установки.

Напір, який розвиває насос, визначається за формулою:

$$H = H_0 + \sum_{i=1}^n h_i,$$

де H_0 – геометрична висота підйому,

h_i – втрати напору на ділянках водопроводу.

Підставляючи ці значення в формулу для W одержимо

$$W = 0,01[(E+p) \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) \times l_i + ((E+p')fr + 8760\gamma\sigma_1 + r\sigma_2)/102\eta \times (H_0 + \sum_{i=1}^n h_i)Q].$$

Позначимо

$$((E+p')fr + 8760\gamma\sigma_1 + r\sigma_2)/102\eta = P$$

Тоді

$$W = 0,01[(E+p) \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) \times l_i + P \times (H_0 + \sum_{i=1}^n h_i)Q]$$

Підставивши значення $h_i = k \frac{Q_i^\beta l_i}{D_i^m}$ одержимо:

$$W = 0,01[(E+p) \sum_{i=1}^n (a + bD_i^\alpha) \times l_i + P \times (H_0 + \sum_{i=1}^n k \frac{Q_i^\beta l_i}{D_i^m})Q]$$

Знайдемо мінімум функції W . Для цього диференціюємо її по ∂D_i і прирівняємо частинну похідну нулю

$$\frac{\partial W}{\partial D_i} = 0,01[(E+p)\alpha b D_i^{\alpha-1} l_i - mPk \frac{Q_i^\beta l_i}{D_i^{m+1}}]Q; \quad \frac{\partial W}{\partial D_i} = 0,$$

$$(E+p)\alpha b D_i^{\alpha-1} - m P k \frac{Q_i^\beta l_i}{D_i^{m+1}} = 0,$$

$$(E+p)\alpha b D_i^{\alpha+m} - m P k Q_i^\beta Q = 0,$$

$$D_i^{\alpha+m} = \frac{m P k Q_i^\beta Q}{(E+p)\alpha b}.$$

Позначивши постійну для даних умов величину

$$\frac{m P k}{(E+p)\alpha b} = \Xi,$$

де Ξ – економічний фактор, одержимо екстремальне значення D_i

$$D_i = \frac{1}{\Xi^{\frac{1}{\alpha+m}} Q^{\frac{1}{\alpha+m}} Q_i^{\frac{1}{\alpha+m}}},$$

Перевіримо, чи буде екстремум мінімумом.

$$\frac{\partial^2 W}{\partial D_i^2} = 0,01[(E+p)\alpha(\alpha-1)b D_i^{\alpha-1} l_i + m(m+1)P k \frac{Q_i^\beta l_i}{D_i^{m+2}}] Q > 0,$$

Враховуючи, що $\frac{\partial^2 W}{\partial D_i^2} > 0$, визначена величина діаметру буде

мінімумом.

Величина показника α в степенній формулі вартості труб відносно мало змінюється для різних труб і умов їх прокладки і може бути прийнята рівною $\alpha=1,8$. Приймавши згідно з Андріяшевим $m=5,34$, для квадратичної залежності при $\beta=2$ одержимо

$$D_i = \Xi^{0,14} Q^{0,14} Q_i^{0,28}.$$

Величина економічного фактору залежить головним чином від вартості електроенергії (діаметр росте зі збільшенням σ) і від вартості труб і

їх прокладки, які враховуються коефіцієнтом β (діаметр зменшується зі збільшенням β).

Приватним випадком визначення економічного розрахунку водопровідної лінії являється розрахунок водоводів. Водовід характеризується тим, що відбір води з нього здійснюється тільки в кінцевій точці, тобто $Q = Q_i$.

Тоді економічний діаметр водоводу рівен

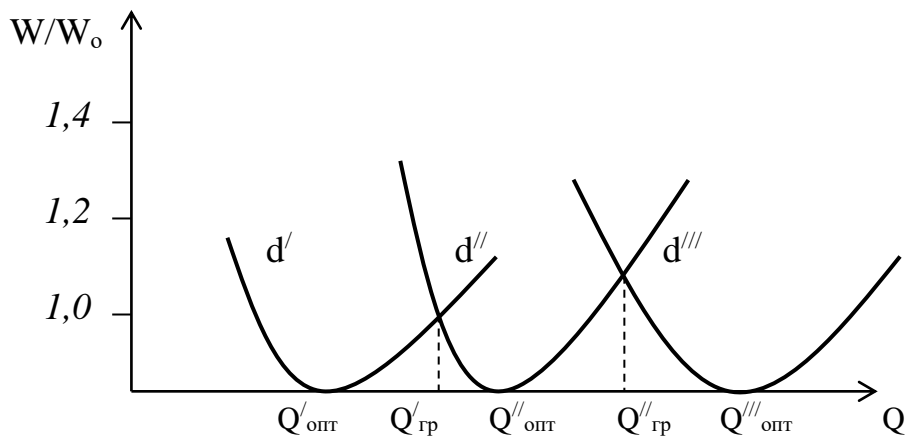
$$D_B = \frac{1}{\Xi^{\alpha+m}} Q^{\frac{1+\beta}{\alpha+m}},$$

або для приватного випадку:

$$D_B = \Xi^{0,14} Q^{0,42}.$$

Враховуючи, що водопровідні труби виготовляються стандартних діаметрів, доводиться приймати в якості економічно самого вигідного діаметру стандартний діаметр найближчий до одержаного з формули. Тому формула визначає не конкретну величину витрати, а цілу область витрат для кожного сортаменту труб. Поняття “граничних витрат” введено проф. Л.Ф. Мошніним. Під граничними витратами розуміються **найбільше і найменше значення витрат**, при яких даний стандартний діаметр при визначеній величині економічного фактора буде більш вигідним, ніж відповідні суміжні діаметри (рис.9.5).

Графічно це можна зобразити, якщо по вісі ординат відкласти відносну величину витрат $W/W_{\text{опт}}$, а по вісі абсцис відповідні величини діаметрів.



W – приведені витрати для труб стандартних діаметрів;
 $W_{\text{опт}}$ – приведені витрати для труб оптимальних діаметрів.

Рисунок 7.5 – Граничні витрати $Q'_{\text{гр}}$ і $Q''_{\text{гр}}$ для d'' .

В практиці розрахунків користуються таблицями граничних витрат, в яких для труб кожного діаметру вказані верхня і нижня межі доцільності їх використання. Ці таблиці складаються для певних значень економічного фактора \mathcal{E}_T . Вони приведені в таблицях Ф.А. Шевельова [15]. Для можливості їх використання необхідно спочатку обчислити “приведену” витрату на кожній ділянці мережі

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{ік}}(\mathcal{E}/\mathcal{E}_T)^{1/(1+\beta)} \approx q_{\text{ік}} \sqrt[3]{\mathcal{E}/\mathcal{E}_T},$$

де $q_{\text{ік}}$ – витрата води, яка протікає ділянкою;

\mathcal{E} – економічний фактор, обчислений для конкретних умов будівництва і експлуатації,

\mathcal{E}_T – економічний фактор, прийнятий при складанні таблиць граничних витрат.

Розглянемо, який вигляд буде у п’езометричної лінії мережі, коли на ділянках економічні діаметри. Гідравлічний ухил визначається формулою

$$i = kQ_i^\beta/D_i^m.$$

Підставимо в цю формулу вираз для економічного діаметра:

$$i = kQ_i^\beta / \left(\frac{m}{\Delta} Q^{\alpha+m} \frac{m}{Q} Q_i^{\alpha+m} \right) =$$

$$= kQ_i^{\beta - (m\beta/(\alpha+m))} / (\Delta Q)^{m/(\alpha+m)} = Q_i^{\alpha\beta/(\alpha+m)} / (\Delta Q/k^{(\alpha+m)/m})$$

Позначивши $\Delta/k^{(\alpha+m)/m}$ через A , одержимо:

$$i = Q_i^{\alpha\beta/(\alpha+m)} / (AQ)^{m/\alpha+m} \quad (3)$$

Для приватного випадку, коли $\alpha=1,8$, $m=5,34$, $\beta=2$ одержимо

$$i = Q_i^{0,5} / (AQ)^{0,75}.$$

В цій формулі знаменник постійний, а витрати, які стоять в чисельнику зменшуються від точки подачі до кінця водоводу. Тоді i ухил п'єзометричної лінії на кожній ділянці буде зменшуватися від початку до кінця водоводу (рис.7.6).

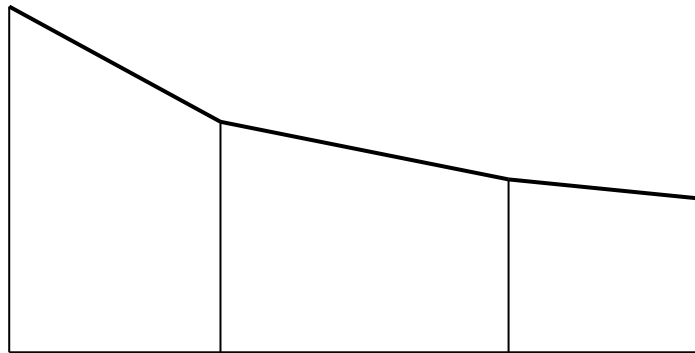


Рисунок 7.6 – Характер п'єзометричної лінії в тупиковій магістралі

Розрахунок складного відгалуження відрізняється від розрахунку головної магістралі тому, що в ньому вільні напори відомі і на початку і в кінці відгалуження (рис.9.7). Але в проміжних вузлах вільні напори будуть залежати від діаметрів, які вибираються на ділянках. Якщо відомі п'єзометричні позначки в вузлах 1 і 4, то втрати в відгалуженні будуть

$$H = \Pi_1 - \Pi_4.$$

З іншого боку

$$H = \sum Q_i^{\alpha\beta/(\alpha+m)} l_i / (AQ)^{m/\alpha+m}.$$

Визначимо, яка величина економічного фактора забезпечить економічне витрачання загальних допустимих втрат напору на відгалуженні.

Питання для самоконтролю

1. Чим пояснюється мала надійність розгалужених мереж?
2. Чим пояснюється менша в порівнянні з кільцевими вартість розгалужених мереж?
3. Чому розгалужені мережі гірше нейтралізують гідравлічні удари, ніж кільцеві?
4. Від чого залежить діаметр водопровідної лінії?
5. Як визначаються втрати напору по довжині в водопровідних лініях?

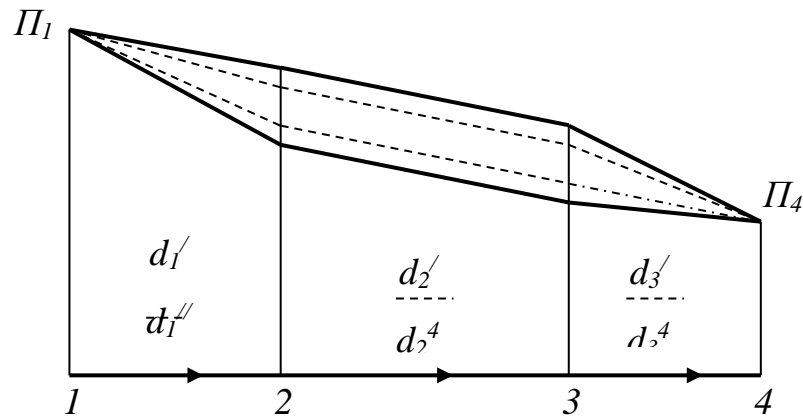


Рисунок 9.7- Можливі п'езометричні лінії на складному відгалуженні

Для цього замість величини A підставимо її значення:

$$A = \mathcal{E}/k^{(\alpha+m)/m}.$$

Тоді одержимо:

$$H = k \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} I_i / (\mathcal{E}Q)^{m/(\alpha+m)}.$$

Звідки:

$$\mathcal{E} = (k/H \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} I_i) / Q.$$

Підставивши значення \mathcal{E} в вираз для найвигіднішого діаметру водоводу одержимо:

$$D_i = (k/H \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} I_i)^{1/m} Q_i^{\beta / (\alpha+m)}.$$

Ця формула дозволяє не тільки визначити найбільш вигідні діаметри в складному відгалуженні, але дає також можливість проаналізувати характер п'езометричних ліній в ньому. Величину економічно найвигідніших гідравлічних ухилів для окремих ділянок визначимо за викладеною вище методикою. Тоді:

$$i = kQ_i^\beta / D_i^m = kQ_i^\beta / ((k/H \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} I_i) Q_i^{m\beta / (\alpha+m)}) =$$

$$= HQ_i^{\beta - (m\beta / (\alpha+m))} / \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} l_i ,$$

$$i = HQ_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} / \sum Q_i^{\alpha\beta / (\alpha+m)} l_i$$

Або для часткового випадку, коли $\alpha=1,8$, $m=5,34$, $\beta=2$:

$$i = HQ_i^{0,5} / \sum Q_i^{0,5} l_i$$

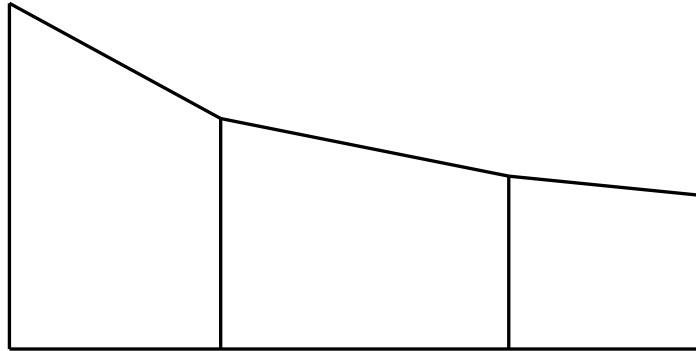


Рисунок 9.8 – Характер п'езометричної лінії в складному відгалуженні

Одержані формули можуть використовуватись не тільки для розгалужених мереж, але і для всіх мереж і їх ділянок, які працюють в указаних вище режимах (наприклад, самопливні водоводи і т.п.).