

Міністерство освіти і науки України
Інженерний навчально-науковий інститут
імені Ю.М. Потебні
Запорізького національного університету

О.Г. Добровольська

**МЕТОДОЛОГІЯ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ
ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ І ОЧИЩЕННЯ РЕЧОВИН, ЩО
ТРАНСПОРТУЮТЬСЯ**

Навчально-методичний посібник
підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
ступеня доктора філософії
спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-наукової
програми
«Будівництво та цивільна інженерія»

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол № від

Запоріжжя
2023

628.1 Добровольська О.Г., Методологія оперативного управління системами інженерних мереж і очищення речовин, що транспортуються : навчально-методичний посібник для підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ступеня доктора філософії спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-наукової програми «Будівництво та цивільна інженерія». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 143 с.

У навчально-методичному посібнику подано в систематизованому вигляді програмний матеріал дисципліни «Методологія оперативного управління системами інженерних мереж і очищення речовин, що транспортуються», аналіз новітніх інформаційних технологій, які застосовуються при управлінні поточкорозподілом у мережах, методи вибору оптимальних параметрів роботи інженерних мереж, методи розрахунку оптимальних режимів роботи споруд, помпових станцій, систем інженерних мереж і очищення речовин, що транспортуються. Наведені приклади розв'язання типових задач з детальними поясненнями. Містить ілюстративний (рисунок, схеми) і табличний матеріали. Для підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ступеня доктора філософії спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» освітньо-наукової програми «Будівництво та цивільна інженерія»

Рецензенти

В. А. Банах, доктор технічних наук, проректор з науково-педагогічної роботи та технічної освіти Запорізького національного університету

Є. А. Манідіна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск

А. В. Банах, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри міського будівництва і архітектури

ЗМІСТ

Вступ

1.Теоретична частина

Розділ 1. Гідравлічні комплекси як головний інструментарій управління потокорозподілом

Тема 1. Аналіз гідравлічних характеристик окремих елементів систем водопостачання

Тема 2. Комбінації елементів в гідравлічних комплексах та їх характеристики

Розділ 2. Методологія дослідження систем транспортування води з контррезервуарами

Тема 3. Загальний аналіз динаміки роботи систем транспортування води з контррезервуарами

Тема 4. Аналіз гідравлічних характеристик розгалужених мереж в гідравлічних комплексах

Розділ 3. Перевірка адекватності математичної моделі потокорозподілу в інженерних системах транспортування води

Тема 5. Перевіркові розрахунки елементів в гідравлічних комплексах з кільцевими мережами

Розділ 4. Аналіз заходів для забезпечення надійного водовідведення в умовах зміни надходження рідини

Тема 6. Особливості гідравлічних комплексів систем очищення речовин, що транспортуються

Розділ 5. Алгоритмізація розрахунків гідравлічних комплексів

Тема 7 Алгоритмізація режимів функціонування інженерних систем транспортування води

Розділ 6. Оперативне управління потокорозподілом в інженерних системах за результатами гідравлічних розрахунків

Тема 8. Алгоритмізація розрахунків елементів водопровідних систем

2.Практична частина

Практичне заняття 1 Вибір оптимального варіанту для апроксимації напірно-витратної характеристики насоса

Практичне заняття 2 Аналіз роботи помпового обладнання

Практичне заняття 3. Аналіз математичної моделі системи водопостачання з розгалуженими мережами

Практичне заняття 4. Аналіз гідравлічних характеристик розгалужених мереж в комплексах

Практичне заняття.5 Елементарні комбінації в гідравлічних комплексах і їх характеристики

Практичне заняття.6 Гідравлічні характеристики і перевіркові розрахунки систем водовідведення

Практичне заняття 7 Перевіркові розрахунки мереж транспортування води та регулювальних місткостей

Практичне заняття 8 Алгоритмізація розрахунків елементів водопровідних систем

Додатки

Література

1. Теоретична частина

Розділ 1. Гідравлічні комплекси як головний інструментарій управління потокорозподілом

Тема 1. Аналіз гідравлічних характеристик окремих елементів систем водопостачання

1. Задачі розрахунків гідравлічного комплексу споруд систем водопостачання.
2. Гідравлічні характеристики елементів систем подачі та розподілу води.
3. Аналіз напірно-витратних характеристик.
4. Характеристика відборів води з системи.
5. Аналіз гідравлічних характеристик мереж транспортування води.

1. Суть задачі проектування і розрахунку комплексу подаючих та розподіляючих воду споруд системи водопостачання зводиться до знаходження такого комплексу, який задовольняв би всім вимогам споживача при мінімальній приведеній вартості. Складність розв'язування цієї задачі визначається великою кількістю чинників, які впливають на елементи комплексу та складністю цих чинників. До таких чинників відносяться:

- а) місцеві природні умови;
- б) необхідність аналізу динаміки гідравлічних комплексів;
- в) економічні міркування;
- г) вимоги надійності.

До місцевих природних умов відноситься рельєф місцевості, кліматичні умови, розміщення і гідрогеологічні характеристики природних джерел, які використовуються, планування об'єкту і характер розміщення зосереджених водорозборів, висота будівель і т.п.

Врахування динаміки роботи комплексів зводиться до необхідності врахування вірогідного режиму на протязі доби, року і всього розрахункового періоду, до необхідності аналізу сумісної роботи елементів комплексу в характерні моменти часу.

Врахування вимог надійності необхідне для забезпечення об'єктів водою в необхідній кількості і при необхідному тискові в любий момент часу. Сюди ж відносяться питання необхідного резервування і дублювання елементів комплексу, кільцювання мереж, передбачення запасних резервуарів.

Економічні міркування при проектуванні комплексу споруд дозволяють запроектувати елементи комплексу з врахуванням мінімальних приведених витрат. Вони зводяться до необхідності врахування капітальних та експлуатаційних витрат при різних варіантах характеристик елементів комплексу.

Врахування всіх цих чинників має свої особливості. Як правило, велика кількість чинників, які впливають на комплекс, приводить до численних варіантів. Рельєф місцевості, наприклад, визначає трасування магістралей водопровідних мереж, необхідність чи відсутність водонапірних башт і резервуарів, необхідність зонування і т.п. Кліматичні умови визначають глибину закладення трубопроводів, вид очисних споруд (відкриті, закриті, швидкі чи повільні фільтри і т.п.), а часто і склад очисних споруд. Планування об'єкту також впливає як на конструктивні особливості окремих елементів (наприклад, кількість і діаметр магістралей в

водопровідних мережах, кількість кілець, наявність однієї чи кількох водонапірних башт і т.п.), так і на їх кількість та взаємну компоновку.

Всі ці статичні чинники приводять до необхідності розгляду кількох технічно рівноцінних варіантів, основою для вибору прийнятного з яких являється мінімум приведених витрат. Задача ще більш ускладнюється необхідністю розгляду роботи комплексу в динаміці.

Елементи гідравлічного комплексу неразривно пов'язані між собою в кожен момент роботи. Крім того, робота всього комплексу нерозривно пов'язана з характером і режимом водовідбору. Любі зміни водовідбору чи зміни в системі ліній, які транспортують воду (аварія або виключення окремих ділянок, зростання гідравлічних опорів) тягне за собою перерозподіл потоків води в мережі і відповідно визиває зміну величин Q і H водоспоживачів. Безперервні, в значній мірі хаотичні і некеровані зміни водоспоживання (особливо в міських водоводах) вносять виняткові труднощі в розрахунки і економічну оцінку водоподаючих систем. Це приводить до необхідності розгляду додаткових варіантів. Для гідравлічного розрахунку системи приходить вибирати певні характерні і критичні періоди, від вдалого вибору яких залежить раціональність рішень, які приймаються.

Враховуючи, що гідравлічний комплекс повинен задовольняти водою об'єкт чи групу об'єктів, він повинен проектуватися так, щоб незважаючи на велику кількість чинників, які впливають на його роботу, споживач не знав перебоїв в водопостачанні, тобто комплекс повинен задовольняти вимогам надійності. Відомий рівень надійності з однієї сторони робить задачу розрахунку комплексу однозначною, а з другої - збільшує кількість варіантів тому, що надійність можна забезпечувати різними комбінаціями елементів комплексу.

Для економічної оцінки системи за розрахунковий термін необхідно проводити інтегрування витрат електроенергії, яка витрачається на підймання води на протязі цього терміну, і відповідних витрат коштів. При змінному режимі і режимі водоспоживання і водоподачі за розрахунковий період, який прогнозується умовно, ця задача являється дуже громіздкою і її точне розв'язання не можна вважати забезпеченим (особливо для міських систем водопостачання). Власне техніко-економічний розрахунок систем подачі і розподілу води полягає в тому, щоб знайти розміри і параметри роботи елементів системи, які забезпечують мінімальні значення приведених витрат. Економічний розрахунок супроводжується проведенням гідравлічних розрахунків, які забезпечують додержання гідравлічних зв'язків між елементами системи, а також дають можливість визначити дійсну картину руху води, розподіл потоків і тисків в системі при уже визначених діаметрах водопровідних ліній.

Розв'язування задачі розрахунку системи подачі і розподілу води з задоволенням умов економічності, із збереженням гідравлічних взаємозв'язків між елементами системи і задоволенням вимог надійності здійснюється в кілька етапів шляхом послідовного наближення.

2. Головними елементами систем подачі та розподілу води, які створюють єдиний гідравлічний комплекс, являються:

- *лінії*, які подають (проводять) воду - водоводи, ділянки мережі;

- *водоживлювачі-насоси*, резервуари, які живлять мережу, пневматичні установки;
- пристрої, які відбирають воду з мережі - *відбори*.

Всі гідравлічні розрахунки систем подачі та розподілу води базуються на залежності між витратами води Q (які проводяться, подаються чи забираються за одиницю часу) і відповідними напорами H (які створюються, втрачаються або які необхідні) в окремих елементах систем, в їх комбінаціях чи в комплексі системи в цілому. Для кожного елементу гідравлічної системи існує певна закономірність, яка зв'язує між собою відповідні величини Q і H . Ця закономірність може бути виражена аналітично чи графічно.

Дійсні величини Q і H при сумісній роботі елементів системи можуть бути одержані тільки в результаті сумісного розв'язування рівнянь, які відображають їх зв'язок, або суміщенням їх графічних характеристик, якщо вони виражені графічно.

Розглянемо гідравлічні характеристики окремих елементів комплексів.

Характеристики водоспоживачів: насосів, напірних резервуарів і пневматичних установок.

Відцентрові насоси. Теоретично повна висота підйому насоса пов'язана з його подачею лінійно. Проте втрати енергії в самому насосі приводять до того, що дійсна залежність H від Q стає нелінійною. Ця залежність точно встановлюється шляхом заводських випробувань кожного типу насосів, які виготовляються, і представляється графічно. Графічні залежності можуть бути описані аналітично багаточленом

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + \dots + a_nQ^n.$$

Є.А. Прегер пропонує цю залежність описувати трьохчленом

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2,$$

де a_0 , a_1 , a_2 - коефіцієнти, які обчислюються на основі графічних характеристик.

Часто в межах рекомендуємої області роботи насосу напірно-витратну характеристику описують кривою другого порядку (рівнянням параболи)

$$H = H_0 - S_nQ^2,$$

де H_0 - напір насоса при $Q=0$ і параболічній залежності;

S_n - фіктивний опір насосів.

3. Характеристики водоспоживачів: насосів, напірних резервуарів і пневматичних установок.

Відцентрові насоси. Теоретично повна висота підйому насоса пов'язана з його подачею лінійно. Проте втрати енергії в самому насосі приводять до того, що дійсна залежність H від Q стає нелінійною. Ця залежність точно встановлюється шляхом заводських випробувань кожного типу насосів, які виготовляються, і представляється графічно. Графічні залежності можуть бути описані аналітично багаточленом

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + \dots + a_nQ^n.$$

Є.А. Прегер пропонує цю залежність описувати трьохчленом

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2,$$

де a_0 , a_1 , a_2 - коефіцієнти, які обчислюються на основі графічних характеристик.

Часто в межах рекомендуємої області роботи насосу напірно-витратну характеристику описують кривою другого порядку (рівнянням параболу)

$$H = H_0 - S_n Q^2,$$

де H_0 - напір насосу при $Q = 0$ і параболічній залежності;

S_n - фіктивний опір насосів.

Визначити ці величини можна, якщо через точки 1 і 2 (рис.1) провести параболу з вершиною, яка лежить на вісі ординат.

Якщо парабола проходить через точки 1 і 2, то справедливі рівняння

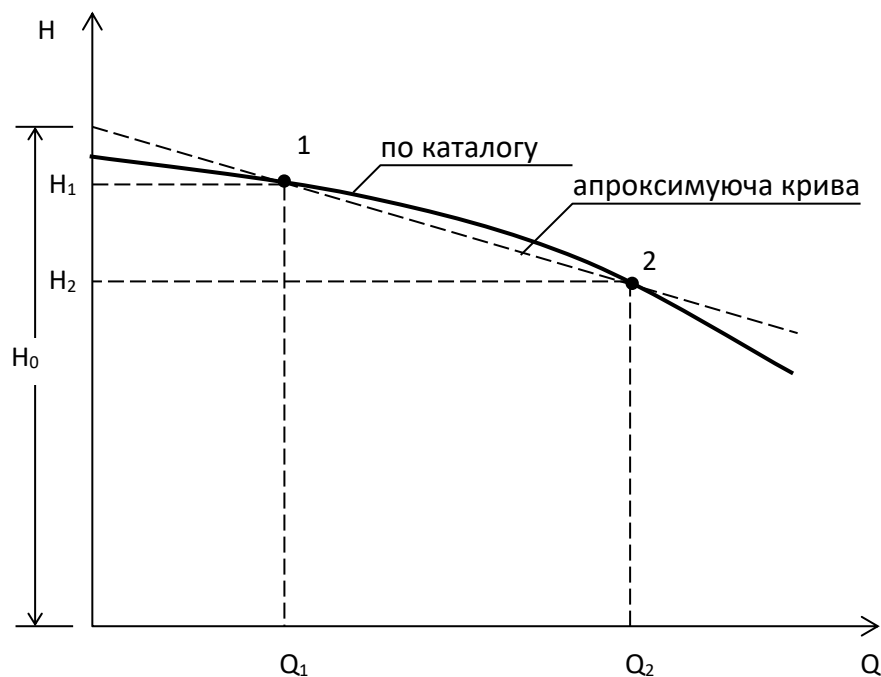


Рисунок 1 - Порівняння напірно-витратних характеристик

Тоді

$$S_n = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2} \quad \text{і} \quad H_0 = H_1 + S_n Q_1^2 = H_2 + S_n Q_2^2.$$

Для групи насосів, які працюють паралельно, загальний коефіцієнт опору буде:

$$S_{cp} = \frac{1}{n^2} S_n ,$$

де n - кількість насосів, які працюють паралельно;
 S_n - фіктивний опір одного насоса.

Величина H_0 для групи насосів, які працюють паралельно буде такою ж, як і для кожного окремого насоса.

Розрахункові характеристики для різних насосів визначені і приведені в технічній літературі М.С. Заневським та В.Г. Ільїним. Поряд з квадратичною залежністю В.Г. Ільїн користується також залежністю

$$H = H_0 - S_n Q^{1,85}.$$

При обточені колеса насосу величину S_n в межах робочої ділянки можна залишити без зміни, а нове значення початкового напору H_0 визначити із виразу

$$H'_0 = H_0 \left(\frac{D'_0}{D_0} \right)^2 ,$$

де H'_0 і D'_0 - напір і діаметр робочого колеса після обточки.

При використанні автоматичного регулювання роботи насоса залежність між Q і H визначається методом регулювання.

Для *поришкових насосів* подача не залежить від напору, який ним створюється, а залежить тільки від потужності двигуна та міцності насосу. При цьому характеристика такого насосу має вигляд **$Q=\text{const}$** , тобто це пряма паралельна вісі ординат.

Напірні резервуари з вільною поверхнею. До таких елементів відносяться водонапірні башти і напірні резервуари. Гідравлічні характеристики таких елементів-це прямі, які паралельні вісі абсцис, і виражаються залежністю **$H=\text{const}$** . Проте практично **$H \neq \text{const}$** тому, що рівень води в резервуарах змінюється в продовж доби. Для водонапірних башт характерна зміна їх ролі: вони по черзі являються то водоспоживачем, то нефіксованим відбором (коли вони приймають надлишок води). Інколи при необхідності в процесі розрахунку систем доводиться враховувати коливання рівня води в резервуарах.

Пневматичні установки. В пневматичних установках постійного тиску аналітично характеристика описується залежністю **$H=\text{const}$** . Для систем змінного тиску, в яких об'єм повітря і води являється функцією часу, характеристика описується законом Бойля-Маріотта

$$P_{abc} W = \text{const}.$$

Мінімальний тиск в резервуарі відповідає його спорожненню. Приведена величина цього тиску еквівалентна мінімальному рівню води у відкритому резервуарі.

Максимальний тиск в резервуарі відповідає його наповненню, а приведена величина цього тиску еквівалентна максимальному рівню води у відкритому резервуарі.

4. Характеристика відборів води з системи. Відбір води з системи може бути фіксованим і нефіксованим. При **фіксованому** відборі величина витрати води залишається постійною.

В централізованих системах водопостачання (особливо міських) величина відбору залежить від багатьох чинників (виду крана, ступеня його відкриття, зміни тиску в системі і т.п.). Незважаючи на це, відбір з однакових кранів в значній мірі стабілізується шляхом відповідного їх відкриття. Як відомо, сукупність зосереджених витрат зводиться до сукупності умовних фіксованих витрат з вузлів. У всіх цих випадках рахують, що $Q = \text{const}$. Разом з тим все більше досліджень присвячується розглядові відбору з мережі як ймовірної величини. Ці дослідження показують, що відбір води з кранів може розглядатися як ймовірна величина, яка розподілена за нормальним законом і в такому випадку вона стає нефіксованим відбором.

Нефіксовані відбори - це відбори в системі міського водопостачання, величина яких залежить від тиску в мережі. До нефіксованих відборів відносяться відбори води в різні відкриті резервуари (регулюючі і запасні ємності, резервуари перед станціями підкачки в зонних водопроводах, баки промислових підприємств, пневматичні установки, відбори насосних станцій безпосередньо з мережі). Нефіксовані відбори води в відкриті резервуари характеризуються позначкою розміщення резервуару (позначкою виливу води або позначкою рівня води). Для заданої розрахункової позначки $H = \text{const}$.

Величина відбору води в цих випадках визначається надлишковим напором в місці виходу води в резервуар. Зміна цього напору при зміні витрат напору в мережі приводить до зміни витрат води, які надходять в резервуар.

При наявності спеціальних регулюючих пристроїв в місці відбору витрата залежить від величини і характеру гідравлічного опору регулятора (при різних ступенях його відкриття). Характеристика водорозбірного пристрою може бути виражена через коефіцієнт місцевого опору ξ .

Втрати напору на місцевий опір визначаються за формулою

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g} = \xi \frac{Q^2}{2g(\pi d^2 / 4)^2} = \frac{8\xi}{g \pi^2 d^4} Q^2 = S_m Q^2,$$

де d - діаметр труби, на якій встановлено місцевий опір.

Якщо ξ не залежить від Q , то характеристика нефіксованого відбору буде

$$H_{\text{відб.}} = Z + S_{\text{відб.}} Q^2,$$

де Z - позначка точки відбору,

$S_{\text{відб.}}$ - гідравлічний опір водорозбірного пристрою (постійний чи змінний в різні моменти часу).

5. **Гідравлічні характеристики водопровідних ліній.** Зв'язок між п'єзометричними напорами Π в вузлах, які обмежують окремі ділянки водопровідних ліній, визначається залежністю

$$\Pi_i - \Pi_k = h_{ik}.$$

Втрати напору на ділянках h_{ik} визначаються через питомий опір або питомі втрати напору. Обидві ці характеристики залежать від того, в якій області працюють труби. При цьому може бути три випадки:

- область квадратичного опору, коли λ і S_0 залежать тільки від діаметру та шершавості внутрішньої поверхні стінок;
- перехідна область турбулентного режиму, коли λ і S_0 залежать від діаметру, шершавості і числа Рейнольдса (тобто від швидкості руху і в'язкості рідини);
- область гідравлічно гладеньких труб, коли λ і S_0 залежать від діаметру труби та числа Рейнольдса і не залежать від її шершавості.

В квадратичній області працюють “бувші в використанні” (не нові) чавунні і сталеві труби при швидкостях руху рідини $v \geq 1,2$ м/с. В перехідній області працюють не нові чавунні і сталеві труби при $v < 1,2$ м/с, а також азбестоцементні труби при всіх швидкостях руху води, які практично використовуються. В області гідравлічно гладеньких труб працюють поліетиленові, вінілпластові і скляні труби. Слід відзначити, що використання приблизних залежностей для визначення втрат напору при розрахунках кільцевих мереж допустимо з огляду на значні допуски в інших характеристиках мереж (водорозбір на різні потреби і т.п.).

Питання для самоконтролю

1. Що відноситься до місцевих природних факторів, які впливають на елементи систем водопостачання і в чому цей вплив виявляється?
2. В чому зміст врахування динаміки роботи комплексів?
3. Як впливає на структуру системи водопостачання врахування вимог надійності?
4. В чому зміст техніко-економічного розрахунку систем подачі і розподілу води?
5. Охарактеризувати головні елементи систем подачі і розподілу води.
- 6.

Тема 2. Комбінації елементів в гідравлічних комплексах та їх Характеристики

1. Особливості першої елементарної комбінації елементів гідравлічного комплексу.
2. Аналіз напірно-витратних характеристик помпового обладнання в елементарній системі.
3. Особливості другої елементарної комбінації елементів гідравлічних комплексів.
4. Аналіз напірно-витратних характеристик помпового обладнання в другій елементарній системі.

5. Особливості третьої елементарної комбінації елементів гідравлічних комплексів.

6.

1. Комбінацій з окремих елементів існує багато. Але всі вони по суті складаються з ряду елементарних комбінацій, головні з яких можна звести до слідуєчих:

- забір відцентровим насосом води з приймального резервуару і подача її в напірну ємність;
- забір води відцентровим насосом і подача її в водовід (мережу) з двома фіксованими відборами в вузлах і нефіксованим відбором в напірний резервуар;
- елементарна система, яка включає насосну станцію I підйому, станцію підкачки і напірний резервуар при заданих фіксованих відборах з мережі.

Розглянемо особливості цих елементарних комбінацій.

Графічне зображення першої елементарної комбінації приведено на рис. 2.

Перша елементарна комбінація включає п'ять елементів: два резервуара, два водоводи і один відцентровий насос. При аналізі його роботи відомі геодезичні позначки Z_i , характеристики трубопроводів S_i і напірно-витратна характеристика насоса. Необхідно визначити подачу Q і напір насоса H . Гідравлічні характеристики резервуарів задані позначками рівнів Z і H_0 , які не залежать від витрат води. Характеристики всмоктувальних і напірних трубопроводів описуються через їх гідравлічні опори, які будуть відомими.

$$h_{\text{вс}} = S_{\text{вс}} Q^2 \quad \text{і} \quad h_{\text{н}} = S_{\text{н}} Q^2.$$

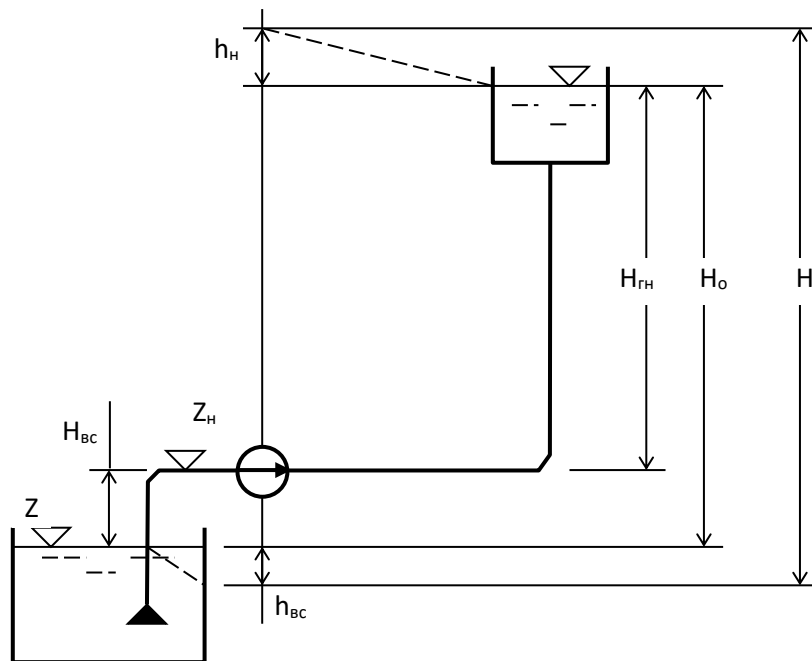


Рисунок 2 - Перша елементарна комбінація елементів гідравлічного комплексу

Характеристика насоса задається кривою $Q-H$ або її аналітичним виразом $H=F(Q)$, де H - повна висота підйому води

$$H_n = H_{гн} + h_n + H_{вс} + h_{вс}.$$

2. Задача визначення величин Q і H при подачі насоса в систему може бути розв'язана графічно. Для цього будується графік, приведений на рис. 3.

Графік будується в такій послідовності. Спочатку будується напірно-витратна характеристика насоса $(Q-H)_n$ (положення 1). Потім ця характеристика зміщується вниз на величину $Q-H_{гн}$ (положення 2). Ординати останньої кривої зменшуються на відповідні величини h_n і одержують нову криву (положення 3). Від початку координат відкладають в верх перевищення вісі насосу рівня води в резервуарі $\Delta Z_n = Z_n - Z$ і проводять горизонтальну лінію. Потім від цієї лінії будують характеристику всмоктувальної лінії (положення 4). Точка перетину кривих 3 і 4 (точка А) дозволяє знайти робочу точку насоса Б, яка визначає подачу насоса Q_n і його напір H_n .

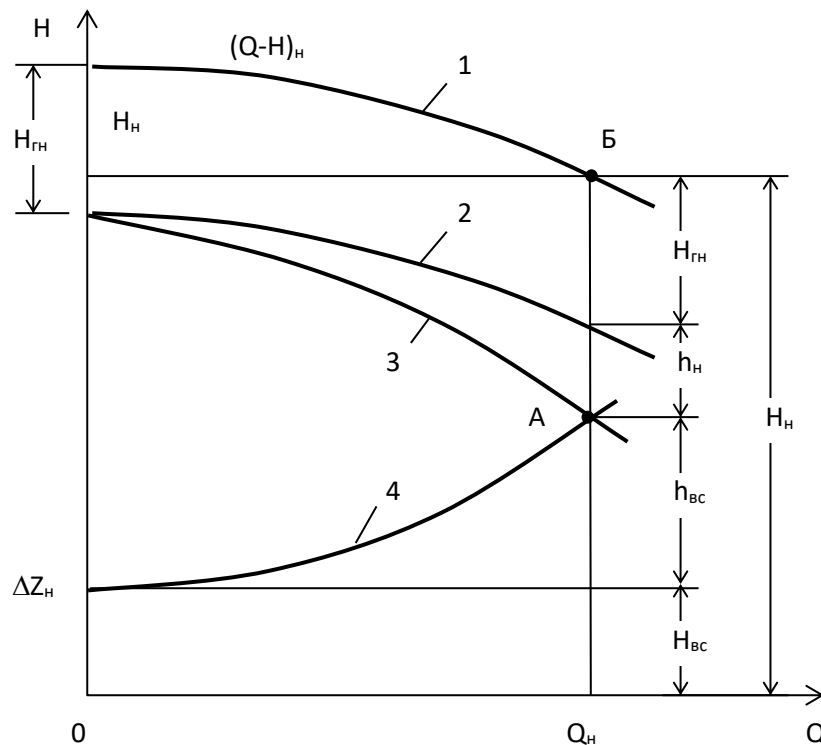


Рисунок 3 - Визначення подачі і напору насоса в елементарній системі

При аналітичному визначенні Q_n і H_n розв'язується система рівнянь

$$\begin{cases} H_n = F(Q), \\ H_n = H_{гн} + H_{вс} + S_n Q^2 + S_{вс} Q^2. \end{cases}$$

Якщо необхідно врахувати зміну рівнів води в резервуарі, то визначають витрати $Q_{мін}$ і $Q_{макс}$ для найнижчого і найвищого рівнів.

Якщо насос працює під заливом, то в приведених вище формулах і графіках висота всмоктування змінює знак.

При відомих розмірах резервуару і витратах води можна визначити час його наповнення і спорожнення, а відповідно і інтенсивність змін рівнів води, а також висот підйому і всмоктування.

3. В другій елементарній комбінації (рис. 4) відцентровий насос подає воду в мережу з двома фіксованими відборами в вузлах 1 і 2 і нефіксованим відбором в напірний резервуар.

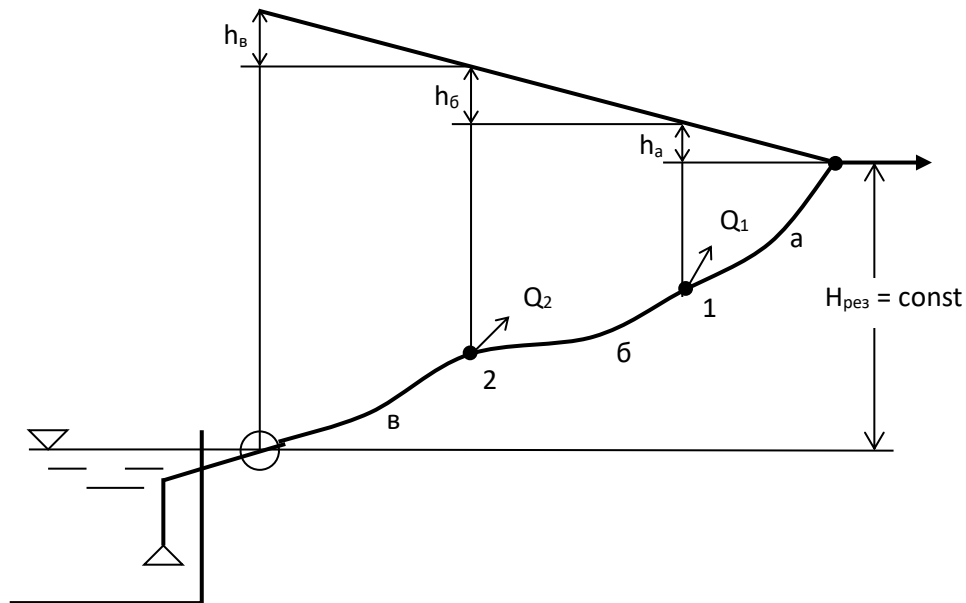


Рисунок 4 - Друга елементарна комбінація гідрравлічних комплексів

При аналізі роботи такої системи відомими являються: напірно-витратна характеристика $Q-H$ насоса, величини фіксованих відборів Q_1 і Q_2 , гідрравлічні опори S_i , позначка води в напірному резервуарі $H_{рез}$. Необхідно визначити подачу води насосом Q_n і відбір резервуаром $Q_{рез} = Q_n - (Q_1 + Q_2)$.

4. Задача може бути розв'язана аналітично чи графічно. Розглянемо графічний метод (рис. 5). Для розв'язання цієї задачі необхідно побудувати графік, який визначав би робочу точку насоса і дозволяв би визначити витрату, яка б при цьому надходила в резервуар. Графік будується в такій послідовності:

- побудувати напірно-витрату характеристику $Q-H$ насоса;
- побудувати шляхом відкладання від вісі абсцис в верх відповідних витрат напорів h_i характеристики кожної з ділянок **а**, **б**, **в**;
- від вісі абсцис відкласти вверх висоту резервуару $H_{рез}$ і провести лінію паралельну їй;
- від горизонтальної лінії на висоті $H_{рез}$ будується характеристика $h_a=f(Q)$ шляхом відкладання вверх від цієї лінії ординат допоміжної кривої "а" (крива 1);

- враховується збільшення витрат на ділянці “б” на величину Q_1 , для чого крива “1” переноситься в положення “2” шляхом додавання до абсцис точок, що лежать на кривій “1”, витрати Q_1 ;
- крива “2” корегується на величину втрат напору на ділянці “б” шляхом їх додавання до ординат точок, які лежать на кривій “2”, що зміщує криву “2” в положення “3”;
- враховується збільшення витрат на ділянці “в” на величину Q_2 , для чого крива “3” переноситься в положення “4” шляхом додавання до абсцис точок, що лежать на кривій “3”, витрати Q_2 ;
- напірно-витратна характеристика $Q-H$ насоса корегується на величину втрат напору на ділянці “в” шляхом відкладання їх вниз від точок, які лежать на кривій $Q-H$, що зміщує криву $Q-H$ в положення “5”.

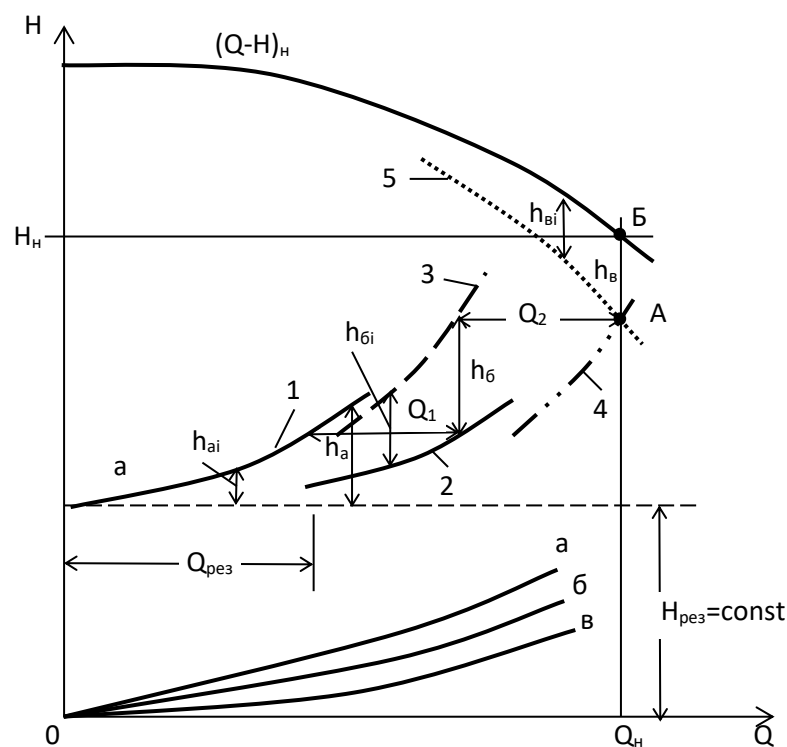


Рисунок 5 - Визначення подачі і напору насоса в другій елементарній системі

Точка перетину кривих “4” і “5” дає точку “А”, яка визначає робочу точку насоса “Б” з координатами Q_n і H_n . Вона також дозволяє знайти витрату води, яка надходить в резервуар. Для цього з точки “А” проводять горизонтальну лінію до перетину з кривою “3”, з якої опускаються вниз до перетину з кривою “2”. З останньої точки проводять горизонтальну лінію до перетину з кривою “1” і опускаються вниз до перетину з горизонтальною лінією на висоті $H_{рез}$. Відрізки між відповідними кривими по горизонталі відповідають величинам Q_1 , Q_2 і $Q_{рез}$, а по вертикалі h_a , h_b і h_6 .

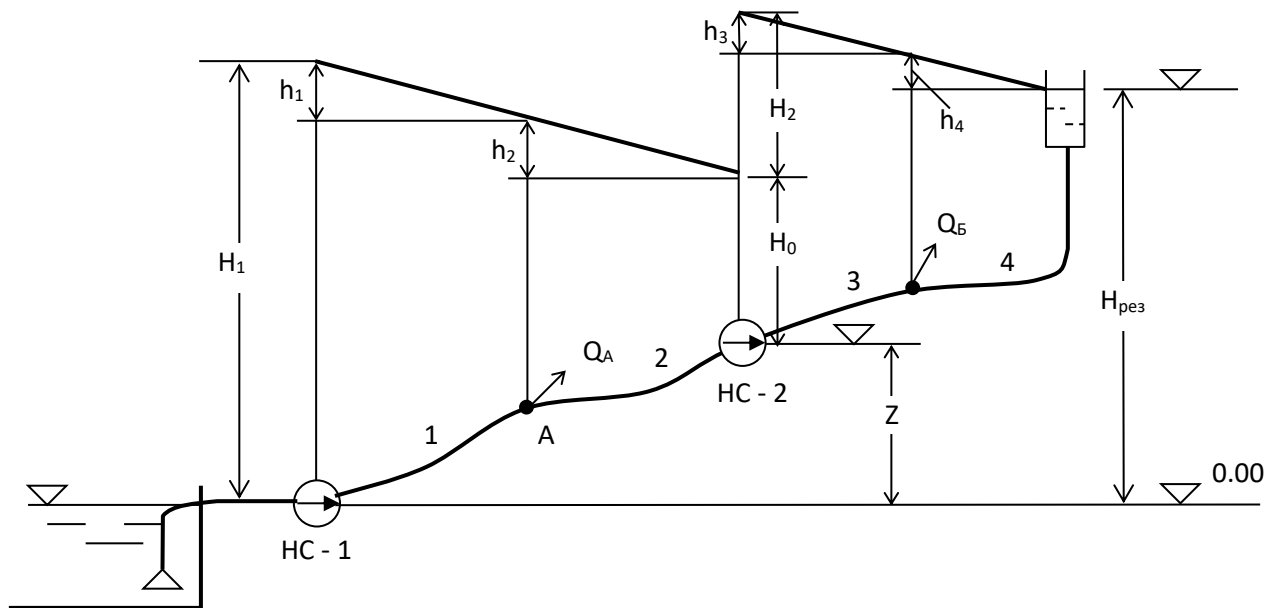
Ця задача може бути розв’язана аналітично шляхом розв’язання системи з двох рівнянь

$$\begin{cases} H_H = f(Q), \\ H_H = H_{рез} + S_6 Q_H^2 + S_6 (Q_H - Q_2)^2 + S_6 (Q_H - Q_1 - Q_2)^2. \end{cases}$$

5. В третій елементарній комбінації (рис. 6) є два насоси, два фіксованих відбора і один нефіксований відбір в напірний резервуар. При розв'язуванні задачі відомі напірно-витратні характеристики насосів $(Q-H)_1$ і $(Q-H)_2$, гідравлічні опори ділянок мережі S_1, S_2, S_3 і S_4 , величини фіксованих відборів в точках Q_A і Q_B та всі геодезичні позначки.

Рисунок 6 - Третя елементарна комбінація гідравлічних комплексів

Станція підкачки забирає воду безпосередньо з мережі. Необхідно визначити величини подачі води насосами Q_1 і Q_2 , всі вузлові напори, всі втрати напору в системі



при сумісній роботі її елементів, витрату, яка надходить в резервуар $Q_{рез}$.

В точці відбору води з мережі другим насосом встановлюється напір H_0 , який повинен задовольняти умовам

$$\begin{cases} H_0 + z = H_1 - S_1 Q_1^2 - S_2 (Q_1 - Q_A)^2, \\ H_0 + z = H_{рез} + S_4 (Q_1 - Q_A - Q_B)^2 + S_3 (Q_1 - Q_A)^2 - H_2. \end{cases}$$

При цьому витрати ділянок 2 і 3 рівні між собою і дорівнюють подачі насосів станції підкачки

$$q_2 = q_3 = Q_2.$$

Подача насосів першого і другого підйомів зв'язані співвідношенням

$$Q_2 = Q_1 - Q_A.$$

Прирівнявши праві частини рівнянь та виразивши всі невідомі в функції подачі Q_1 , одержимо одне рівняння з одним невідомим.

$$F_1(Q_1) - S_1 Q_1^2 - S_2 (Q_1 - Q_A)^2 = H_{pez} + S_3 (Q_1 - Q_A)^2 + S_4 (Q_1 - Q_A - Q_B)^2 - F_2(Q_2),$$

або

$$F_1(Q_1) + F_2(Q_2) = H_{pez} + S_1 Q_1^2 + S_2 (Q_1 - Q_A)^2 + S_3 (Q_1 - Q_A)^2 + S_4 (Q_1 - Q_A - Q_B)^2.$$

Розв'язати це рівняння можна числовими методами шляхом послідовного наближення. Графічне рішення цієї задачі громіздке.

Питання для самоконтролю

1. Якою аналітичною залежністю можна описати напірно-витратну характеристику відцентрового насосу?
2. Якою аналітичною залежністю можна описати напірно-витратну характеристику поршневого насосу?
2. Як описуються характеристики напірних і безнапірних резервуарів?
4. Яку аналітичну характеристику мають пневматичні установки?

Тема 3. Загальний аналіз динаміки роботи систем транспортування води з контррезервуарами

1. Особливості живлення системи в умовах зміни відборів води.
 2. Аналіз пезометричних карт систем транспортування води в умовах зміни відборів води
 3. Графічний аналіз сумісного функціонування складових елементарної системи.
 4. Перевірочний розрахунок розгалуженої мережі транспортування води з контррезервуаром.
1. Самою простою системою являється система з контррезервуаром. В такій системі башта може бути або нефіксованим відбором або другим джерелом живлення з заданим напором. В першому випадку

2.

$$Q_n = \sum Q_i + Q_6 ,$$

в другому

$$\sum Q_i = Q_n + Q_6 .$$

Розглянемо спочатку елементарну систему у вигляді магістралі з одним фіксованим відбором води **Q** в точці **A** та двома баштами різної висоти **B₁** і **B₂** (рис.11).

При аналізі системи відомі висоти башт **H₁** і **H₂**, гідравлічні опори трубопроводів **S₁** і **S₂**, величина витрати **Q** в вузлі **A**, а також необхідний мінімальний напір в ньому **H_A**. Характер живлення системи, яка отримує воду від двох башт, повністю залежить від величини витрати **Q**, яка відбирається в вузлі **A** (рис. 11). При всіх можливих режимах башта **B₁** буде виступати в ролі водоживлювача, тоді як башта **B₂** (як більш низька) в залежності від величини відбору **Q** може бути водоживлювачем і відбором. Аналізуючи роботу системи можна знайти критичну величину **Q**, при якій один режим переходить в другий. Коли надходження води з водонапірної башти **B₁** перевищує фіксований відбір в точці **A**, надлишок води поступає в башту **B₁** і

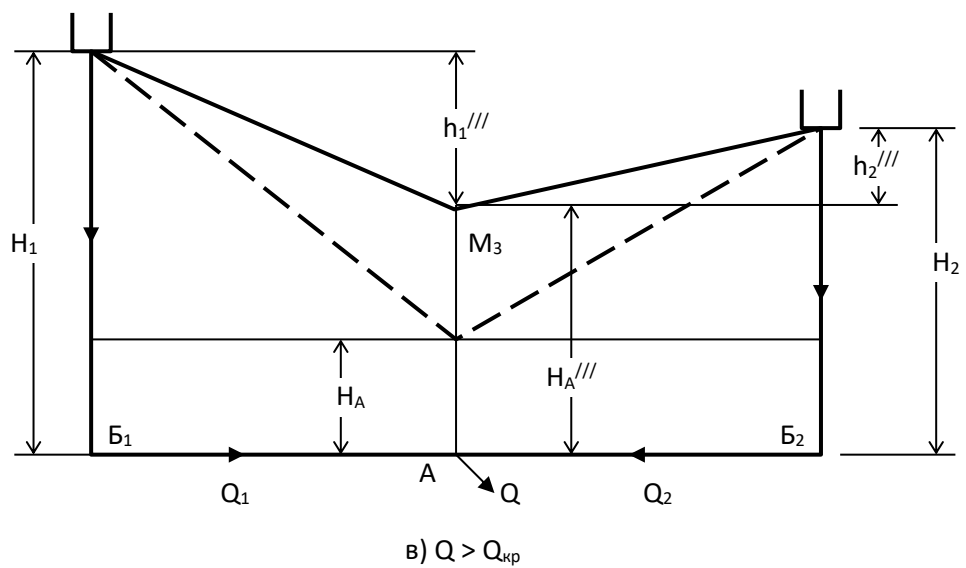
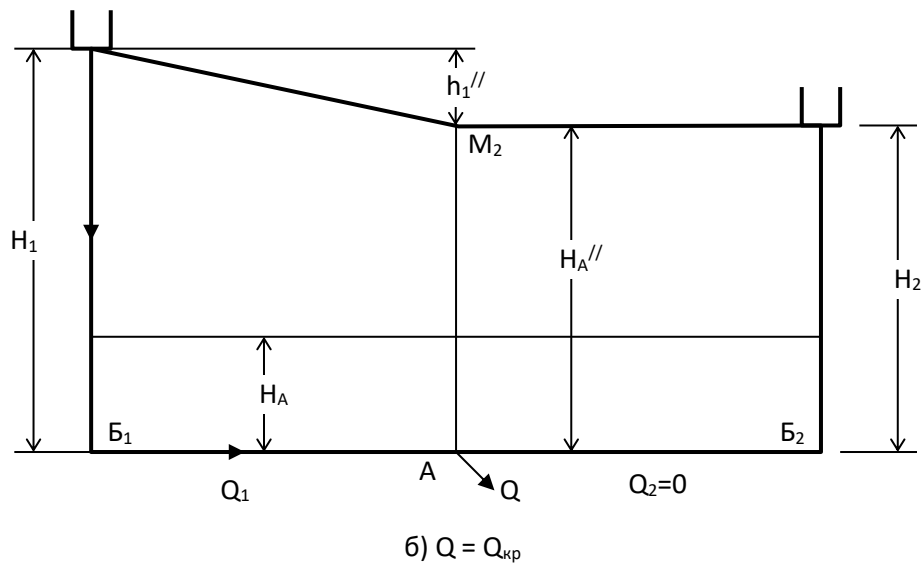
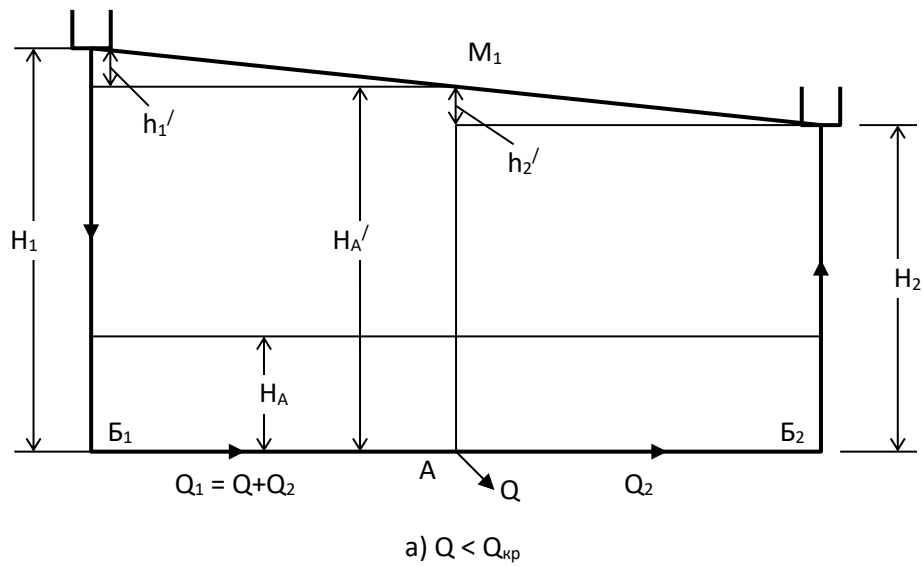


Рисунок 11 - Характер живлення системи в залежності від величини відбору

Величину $Q_{кр}$ можна знайти із співвідношення

$$S_1 Q_{кр}^2 = H_1 - H_2 = h_1^{//}.$$

Тоді

$$Q_{кр} = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{S_1}}.$$

Якщо $Q > Q_{кр}$, живлення мережі буде двостороннім. При цьому величини витрат Q_1 і Q_2 , а також напір в вузлі $H_A^{///}$ і можуть бути знайдені з таких співвідношень

$$h_1^{///} = S_1 Q_1^2; \quad h_2^{///} = S_2 Q_2^2; \quad Q_1 + Q_2 = Q;$$
$$H_1 - S_1 Q_1^2 = H_2 - S_2 Q_2^2$$

або

$$S_1 Q_1^2 - S_2 Q_2^2 = H_1 - H_2.$$

Найбільшу допустиму величину Q в вузлі A можна одержати, якщо напір в ньому стане рівним потрібному H_A .

Величини $Q_{макс}$ і $H_{A\ мин}$ зв'язані співвідношеннями

$$h_{1\ макс} = H_1 - H_{A\ мин},$$
$$S_1 Q_{макс}^2 = H_1 - H_{A\ мин}.$$

Тоді найбільша можлива подача від башти B_1 буде

$$Q_{1\ макс} = \sqrt{\frac{H_1 - H_{A\ мин}}{S_1}}.$$

Найбільша можлива подача від башти B_2 буде

$$Q_{2\ макс} = \sqrt{\frac{H_2 - H_{A\ мин}}{S_2}}.$$

Тоді максимальна витрата в вузлі A може бути рівною

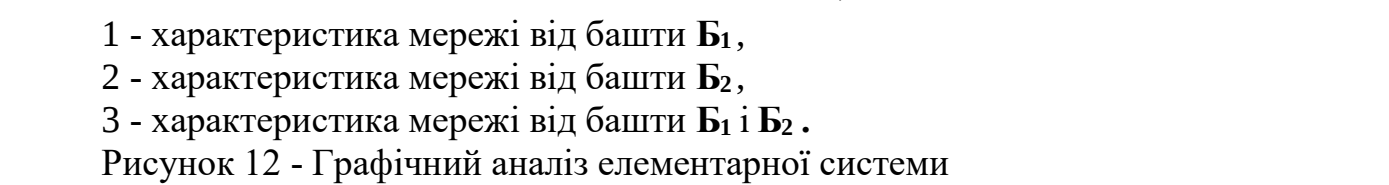
$$Q_{макс} = Q_{1\ макс} + Q_{2\ макс}.$$

3. Задача також може розв'язуватись графічно (рис. 12). Особливо це доцільно, коли замість однієї башти використовується насосна станція.

Порядок розв'язування задачі:

- Провести паралельно осі абсцис лінії, які відповідають висотам B_1 і B_2 .
- Побудувати характеристики кожної з башт з врахуванням характеристик трубопроводів, які підводять воду до вузла A . Для цього з ординат вихідних характеристик башт вирахувати втрати напору в трубопроводах h_1 і h_2 .
- Побудувати характеристику сумісної роботи обох башт на мережу, яка виконується так, як і будівництво характеристики сумісної паралельної роботи двох різних насосів.

The graph shows the head H on the vertical axis and discharge Q on the horizontal axis. Two parallel pumps are represented by curves 1 and 2. The total discharge is Q_i , and the total head is H_1 . The head loss in the pipeline is h_1 . The operating point is at Q_{kp} and H_2 . The head loss in the pipeline at the operating point is h_2 . The discharge of pump 1 is Q_1 and the discharge of pump 2 is Q_2 . The head of pump 1 at the operating point is M_1 and the head of pump 2 at the operating point is M_2 .



- Рисунок 12 - Графічний аналіз елементарної системи

The diagram shows a mechanism with 8 links and 5 joints. The links are numbered 1 through 8. Link 1 is the fixed frame, represented by a square labeled 'H.C.T.'. Link 2 is a long horizontal link. Link 3 is a short horizontal link. Link 4 is a vertical link. Link 5 is a vertical link. Link 6 is a horizontal link. Link 7 is a horizontal link. Link 8 is a vertical link. The joints are numbered 1 through 5. Joint 1 is a revolute joint between links 1 and 2. Joint 2 is a revolute joint between links 2 and 4. Joint 3 is a revolute joint between links 2 and 3. Joint 4 is a revolute joint between links 3 and 8. Joint 5 is a revolute joint between links 4 and 5.

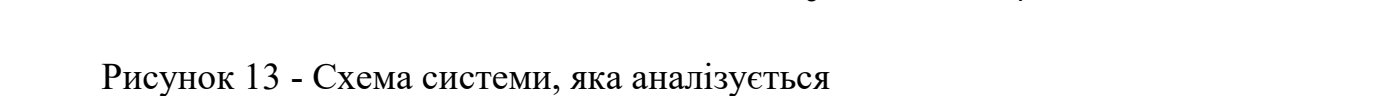
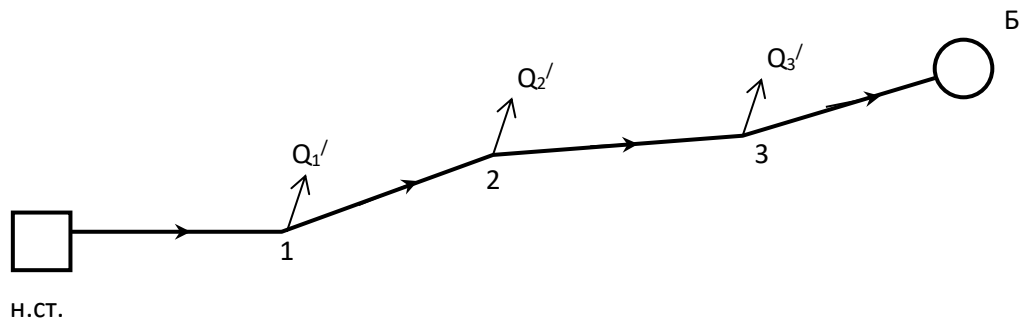


Рисунок 13 - Схема системи, яка аналізується

У вузлах мережі відомі фіксовані витрати Q_i , гідравлічні опори ділянок S_i , характеристики водоживлювачів. Необхідно визначити подачі водоживлювачів і напори в вузлах системи. Реальну схему можна замінити спрощеною схемою (рис.14), якщо врахувати, що відгалуження доцільно замінити зосередженими витратами. В такій схемі є критична витрата при $Q_6 = 0$. В цей момент сумарна втрата напору в магістралі до точки 3 буде дорівнювати різниці напору, який створюється насосом, і розрахункової позначки рівня води в баці башти.

При $\sum Q_i > (\sum Q_i)_{кр}$ живлення магістралі буде двостороннім, при $\sum Q_i < (\sum Q_i)_{кр}$ буде спростерігатися транзит води в башту. В час мінімального водоспоживання в башту буде надходити витрата

$$Q_6 = Q_H - (\sum Q_i)'.$$



В цьому випадку витрата Q_6 повинна розглядатися як нефіксований відбір.

В такій системі буде p невідомих лінійних витрат q_{ik} , невідома подача Q_H і невідомий нефіксований відбір Q_6 , а також $m-1$ невідомих вузлових напорів H_i . Загальна кількість невідомих

$$p + e + m - 1.$$

Для розв'язання цієї задачі можна використати m рівнянь першої групи, p рівнянь другої групи, $e-1$ рівнянь четвертої групи, тобто загальна кількість рівнянь достатня для визначення всіх невідомих. Разом з тим кількість невідомих витрат перевищує число рівнянь першої групи $p + e > m$ ($p=4$, $e=2$, $p+e=6$, $m=5$).

Щоб розв'язати цю задачу необхідно додаткове рівняння, яким може бути рівняння “зовнішньої ув'язки” насосів і башти

$$H_H - (\sum h_{ik})_H = H_6.$$

Рівняння першої групи можна представити у вигляді

$$Q_H = Q_6 + \sum Q_i.$$

Тоді разом з рівнянням, яке відображає характеристику насосу

$$H_H = F(Q_H)$$

одержимо три рівняння, які достатні для визначення головних трьох невідомих Q_n , Q_6 і H_n .

В рівнянні “зовнішньої ув’язки” всі витрати можуть бути зображені через невідому витрату Q_6 та відомі фіксовані відбори в вузлах Q_i . Наприклад, для мережі, яка приведена на рис. 14, одержимо

$$H_n - [S_{1-n.ст.}(Q_6 + \sum Q_i)^2 + S_{1-2}(Q_6 + Q_2' + Q_3')^2 + S_{2-3}(Q_6 + Q_3')^2 + S_{3-6} Q_6^2] = H_6.$$

Цей вираз - характеристика **Q-H** магістралі, яка з’єднує насос з баштою. Її символічно можна представити у вигляді

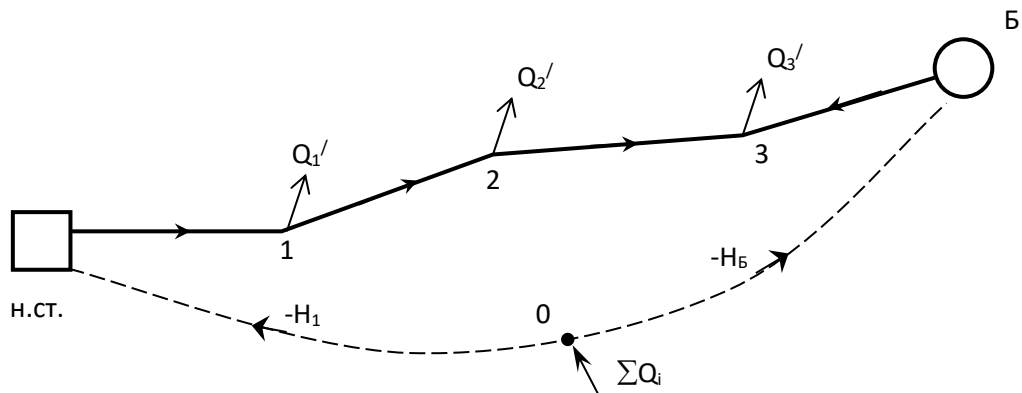
$$H_n - \varphi(Q_6) = H_6.$$

При $Q_6=0$ це рівняння дає величину H_n , яке відповідає моменту, коли $\sum Q_i = (\sum Q_i)_{кр.}$

Аналіз роботи системи може бути проведено також графічно. При цьому методика буде аналогічною розглянутій раніше тільки замість першої башти приймається характеристика **Q-H** насоса.

Розглянемо випадок двохстороннього живлення магістралі, коли вода буде надходити в мережу від насосної станції і від башти. В цьому випадку система буде мати вигляд, який приведено на рис. 15.

Рисунок 15 - Схема розгалуженої мережі при двохсторонньому живленні



Складемо рівняння зовнішньої ув’язки для системи на рис. 15. Для цього вибираємо фіктивний вузол “0” і з’єднуємо його фіктивними лініями з насосною станцією та баштою (на рис.15 ці лінії показані пунктиром). Рахуємо умовно, що загальна витрата системи подається в вузол “0”. Тоді напрям руху в фіктивних лініях призначається так, щоб зберігалася умова $\sum Q_{вузл.} = 0$.

Головне балансове рівняння для системи буде мати вигляд

$$Q_n + Q_6 - \sum Q_i = 0.$$

або

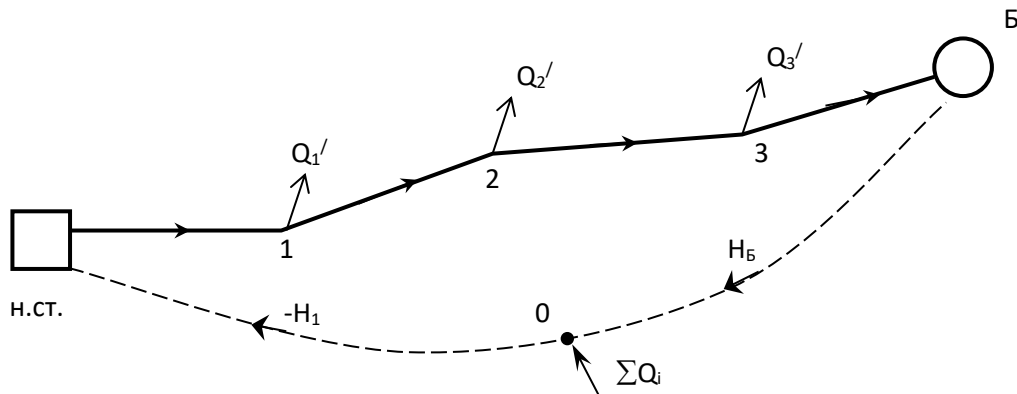
$$\sum Q_i = Q_n + Q_6.$$

Рівняння ув’язки фіктивного кільця буде таким

$$-H_1 + (\sum h)_1 - (\sum h)_6 + H_6 = 0.$$

Якщо живлення з однієї сторони (транзит води в башту) фіктивний контур буде мати вигляд, який приведено на рис. 16.

Рисунок 16 - Схема розгалуженої мережі при односторонньому живленні



Головне балансове рівняння такої системи виражається рівнянням балансу фіктивних витрат в вузлі “0”.

$$\sum Q_i + Q_6 = Q_H.$$

Рівняння ув'язки фіктивного кільця має вигляд

$$H_H - (\sum h)_1 + H_6 = 0.$$

Знак “плюс” перед напором H_6 пояснюється тим, що рух води в фіктивній лінії в цьому випадку повинен бути до фіктивного вузла.

Питання для самоконтролю

1. Що таке фіктивні витрати?
2. Як скласти рівняння зовнішньої ув'язки?
3. Як змінюється живлення мережі в залежності від водовідбору?
4. Що таке критична витрата?
5. Рівняння Ейлера?

Тема 4. Аналіз гідравлічних характеристик розгалужених мереж в гідравлічних комплексах

1. Аналіз гідравліки роботи системи транспортування води з двома насосними станціями і однією регулюючою ємністю.
2. Особливості потокорозподілу при застосуванні схеми розгалуженої мережі в умовах двостороннього живлення.

3. Принцип розрахунку розгалужених систем з кількома насосними станціями і кількома напірно-регулюючими резервуарами.

4. Особливості перевірочних розрахунків систем транспортування води із замкнутими контурами.

1. Розглянуті методи можуть бути розповсюджені на системи з будь-якою кількістю живлячих насосних станцій і регулюючих ємностей. Нехай воду в систему подають дві насосні станції і одна водонапірна башта (рис. 17).

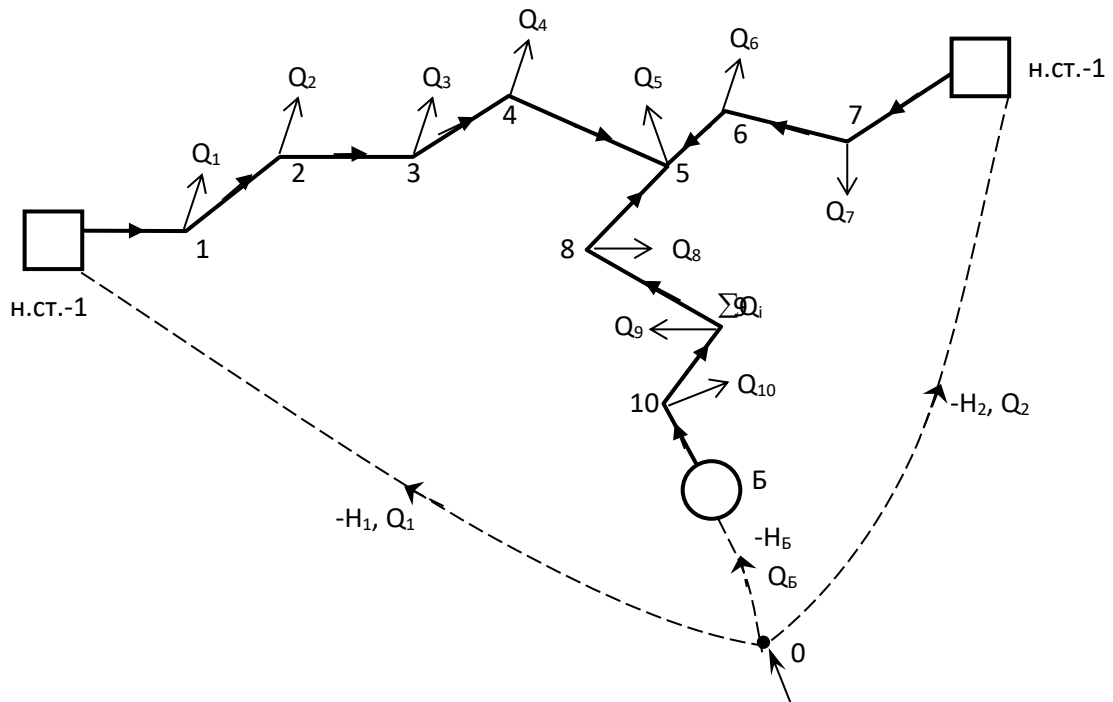


Рисунок 4.1 - Схема системи з двома насосними станціями і однією водонапірною баштою

Для визначення всіх характеристик аналізованої системи необхідно використати рівняння першої, другої і четвертої груп. Витрати насосних станцій і водонапірної башти пов'язані залежностями:

- для випадку надходження води в бак

-

$$Q_1 + Q_2 = \sum Q_i + Q_6 ,$$

- для випадку подачі води з башти

-

$$Q_1 + Q_2 + Q_6 = \sum Q_i .$$

Рівняння зовнішньої ув'язки будуть мати вигляд:

- для випадку подачі води в бак башти

-

$$H_1 - (\sum h)_1 + (\sum h)_6 - H_6 = 0 ,$$

$$H_6 - (\sum h)_6 + (\sum h)_2 - H_2 = 0 ;$$

- для випадку подачі води з башти

-

$$H_1 - (\sum h)_{1-6} - H_6 = 0 ,$$

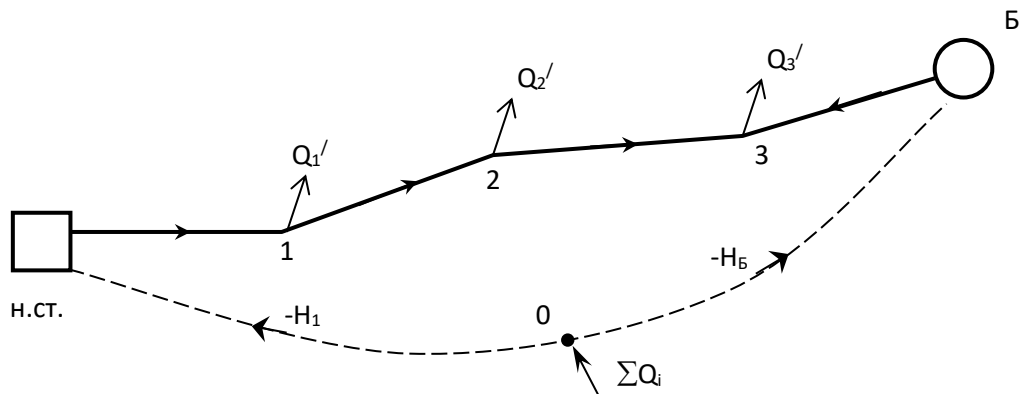
$$H_6 + (\sum h)_{6-2} - H_2 = 0 .$$

Якщо в цих рівняннях всі напори водоживлювачів і втрати напорів виразити через витрати Q_1 , Q_2 і Q_6 , то кількість таких рівнянь буде достатньою для визначення останніх.

Задачу можна розв'язувати шляхом підбору або ув'язки фіктивних кілець (шляхом послідовного наближення).

Розглянемо випадок двохстороннього живлення магістралі, коли вода буде надходити в мережу від насосної станції і від башти. В цьому випадку система буде мати вигляд, який приведено на рис. 15.

і



2.

Рисунок 4.2 - Схема розгалуженої мережі при двохсторонньому живленні

Складемо рівняння зовнішньої ув'язки для системи на рис. 15. Для цього вибираємо фіктивний вузол "0" і з'єднуємо його фіктивними лініями з насосною станцією та баштою (на рис.15 ці лінії показані пунктиром). Рахуємо умовно, що загальна витрата системи подається в вузол "0". Тоді напрям руху в фіктивних лініях призначається так, щоб зберігалася умова $\sum Q_{\text{вузл.}} = 0$.

Головне балансове рівняння для системи буде мати вигляд

$$3. \quad Q_H + Q_6 - \sum Q_i = 0 .$$

або

$$4. \quad \sum Q_i = Q_H + Q_6 .$$

Рівняння ув'язки фіктивного кільця буде таким

$$- H_1 + (\sum h)_1 - (\sum h)_6 + H_6 = 0 .$$

Якщо живлення з однієї сторони (транзит води в башту) фіктивний контур буде мати вигляд, який приведено на рис. 4.3.

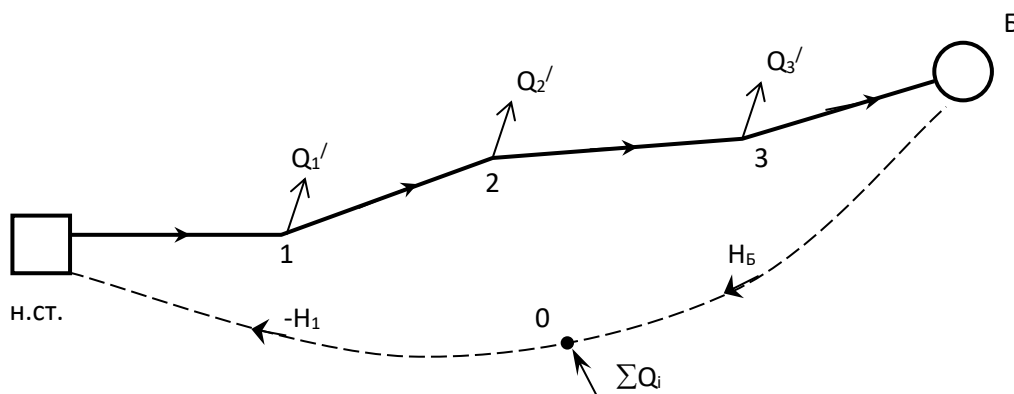


Рисунок 4.3 - Схема розгалуженої мережі при односторонньому живленні

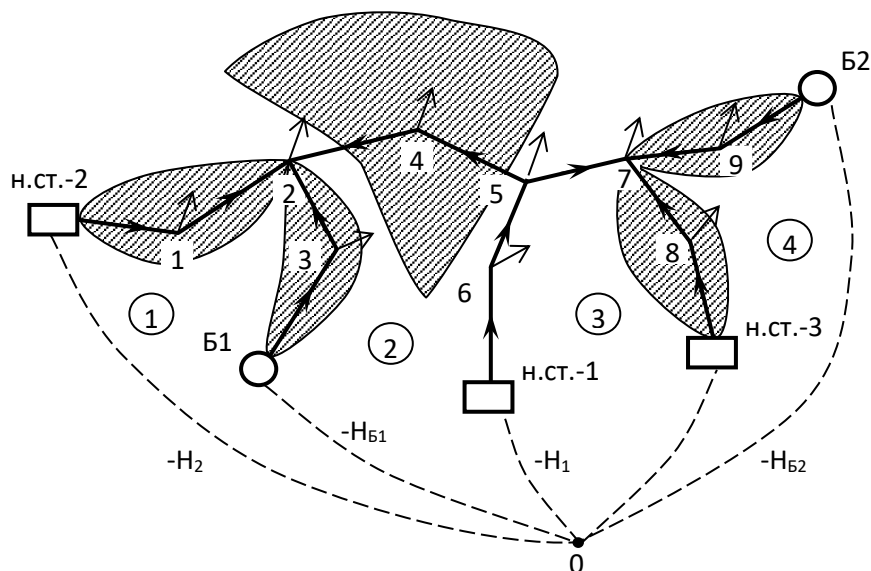
Головне балансове рівняння такої системи виражається рівнянням балансу фіктивних витрат в вузлі “0”.

$$\sum Q_i + Q_b = Q_n.$$

Рівняння ув'язки фіктивного кільця має вигляд

$$H_n - (\sum h)_1 + H_b = 0.$$

Знак “плюс” перед напором H_b пояснюється тим, що рух води в фіктивній лінії



в цьому випадку повинен бути до фіктивного вузла. Розглянемо систему з трьома насосними станціями і двома регулюючими ємностями (рис. 4.4).

Рисунок 4.4 - Схема системи з трьома насосними станціями і двома водонапірними баштами

Для такої системи слід спочатку вибрати розрахункові моменти:

- найбільшого надходження води в ємності;
- найбільшої подачі води з них в мережу.

Потім необхідно намітити для обох випадків вірогідну картину живлення системи від насосних станцій і башт і прийняти для попереднього розрахунку величини їх подач. На рис. 18 показано випадок максимального водоспоживання. Для цього випадку можна скласти рівняння зовнішньої ув'язки для чотирьох фіктивних кілець:

- для кільця №1: $H_2 - (\sum h)_2 + (\sum h)_{61} - H_{61} = 0$,
- для кільця №2: $H_{61} - (\sum h)_{61} + (\sum h)_1 - H_1 = 0$,
- для кільця №3: $H_1 - (\sum h)_1 + (\sum h)_3 - H_3 = 0$,
- для кільця №4: $H_3 - (\sum h)_3 + (\sum h)_{62} - H_{62} = 0$.

В цих рівняннях індекси відповідають номерам насосних станцій і водонапірних башт. Якщо виразити всі напори в функції витрат водоживлювачів, то разом з балансовим рівнянням

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{61} + Q_{62} = \sum Q_i$$

одержимо п'ять рівнянь для отримання всіх витрат. Задача розв'язується так, як було розглянуто раніше.

4. При перевіірочних розрахунках систем, які мають кількість водоживлювачів $e > 1$, а також p замкнутих контурів, необхідно використати m рівнянь першої групи $\sum Q = 0$, $(p - m)$ рівнянь другої групи, p рівнянь “внутрішньої” ув'язки і $(e - 1)$ рівнянь “зовнішньої” ув'язки.

Нехай система має одне кільце з двома фіксованими відборами, одним нефіксованим відбором в резервуар і одним резервуаром, який живить цю систему (рис. 19). Необхідно знайти витрату, яка находить в нижній резервуар, всі лінійні витрати, а також загальну подачу води в систему. Величини всіх гідравлічних опорів відомі.

Для визначення невідомих витрат можна використати чотири вузлових

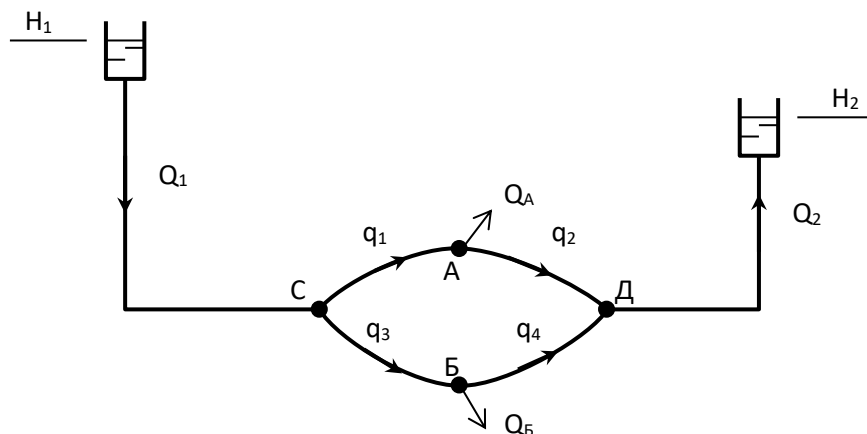


Рисунок 4.5 - Схема системи з одним кільцем і двома баштами

рівняння $\sum Q_{вузл}=0$, одне рівняння внутрішньої ув'язки $\sum h_k=0$ і одне рівняння зовнішньої ув'язки

$$H_1 - H_2 = \sum h_i .$$

Рівняння внутрішньої ув'язки буде мати вигляд

$$h_{CA} + h_{AD} - h_{CB} - h_{BD} = 0$$

або

$$S_{CA} q_1^2 + S_{AD} q_2^2 - S_{CB} q_3^2 - S_{BD} q_4^2 = 0 .$$

Рівняння зовнішньої ув'язки може бути написано з включенням однієї чи другої вітки кільця, тобто

$$H_1 - h_1 - (h_{CA} + h_{AD}) - h_2 = H_2 ;$$

$$H_1 - h_1 - (h_{CB} + h_{BD}) - h_2 = H_2 .$$

Цих рівнянь достатньо для визначення незалежних невідомих h_1 і h_i або (що те ж саме) Q_1 і q_1 . Якщо з першого рівняння відняти друге, одержимо рівняння внутрішньої ув'язки

$$(h_1 + h_2) - (h_3 + h_4) = 0 .$$

Витрати окремих ділянок можна представити через дві незалежні витрати: витрату Q_1 і одну з витрат ділянок **СА** і **СБ**. Наприклад,

$$\begin{aligned} q_1 &= \alpha Q_1; & q_2 &= \alpha Q_1 - Q_A; & q_3 &= (1-\alpha)Q_1; \\ q_4 &= (1-\alpha)Q_1 - Q_B; & Q_2 &= Q_1 - \sum Q_i, \end{aligned}$$

де $\sum Q_i = Q_A + Q_B$.

Використовуючи ці витрати в наведених вище рівняннях, після відповідних перетворень одержимо два рівняння з двома невідомими α і Q_1 :

$$\begin{cases} (S_{CA} + S_{AD} - S_{CB} - S_{BD})(\alpha Q_1)^2 + 2(S_{CB} + S_{BD})\alpha Q_1^2 - (S_{CB} + S_{BD})Q_1^2 - \\ - 2(S_{CB}Q_A + S_{BD}Q_B)\alpha Q_1 + 2S_{BD}Q_BQ_1 + (S_{AD}Q_A^2 - S_{BD}Q_B^2) = 0, \\ (S_{CA} + S_{AD})(\alpha Q_1)^2 + (S_1 + S_2)Q_1^2 + (S_1 + S_2)Q_1^2 - 2S_2Q_A - \alpha Q_1 - \\ - 2S_2(\sum Q_i)Q_1 + [S_2(\sum Q_i)^2 + S_{AD}Q_A^2 - \Delta H] = 0. \end{cases}$$

Розглянемо тепер випадок, коли обидві башти будуть подавати воду в мережу (рис. 20).

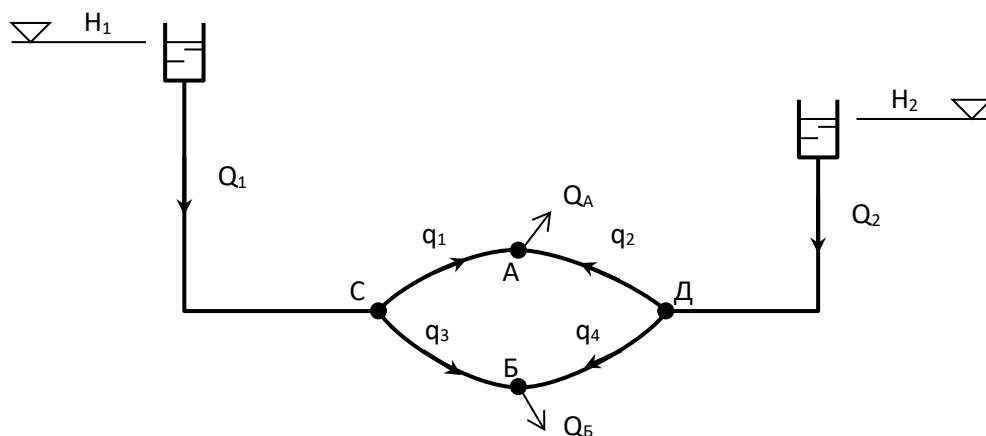


Рисунок 4.6 - Схема системи з одним кільцем і двома вежами, які подають воду в мережу

В цьому випадку будують ті ж невідомі, що і раніше, і принципово та ж система рівнянь. Різниця буде в вузлових рівняннях для вузлів сходу і в рівняннях зовнішньої ув'язки, яка прийме вигляд

$$H_1 - h_1 - h_{CA} + h_{AD} + h_2 = H_2$$

або

$$H_1 - S_1 Q_1^2 - S_{CA} q_1^2 + S_{AD} q_2^2 + S_2 Q_2^2 = H_2 .$$

В рівняннях внутрішньої ув'язки зміняться тільки знаки:

$$h_{CA} - h_{AD} - h_{CB} + h_{BD} = 0$$

або

$$S_{CA} q_1^2 - S_{AD} q_2^2 - S_{CB} q_3^2 + S_{BD} q_4^2 = 0 .$$

Ці рівняння виражають умови ув'язки дійсного і фіктивного замкнутих контурів. Їх розв'язання аналогічне раніше розглянутому.

Розглянемо ту ж систему, але з двома насосними станціями (рис. 21).

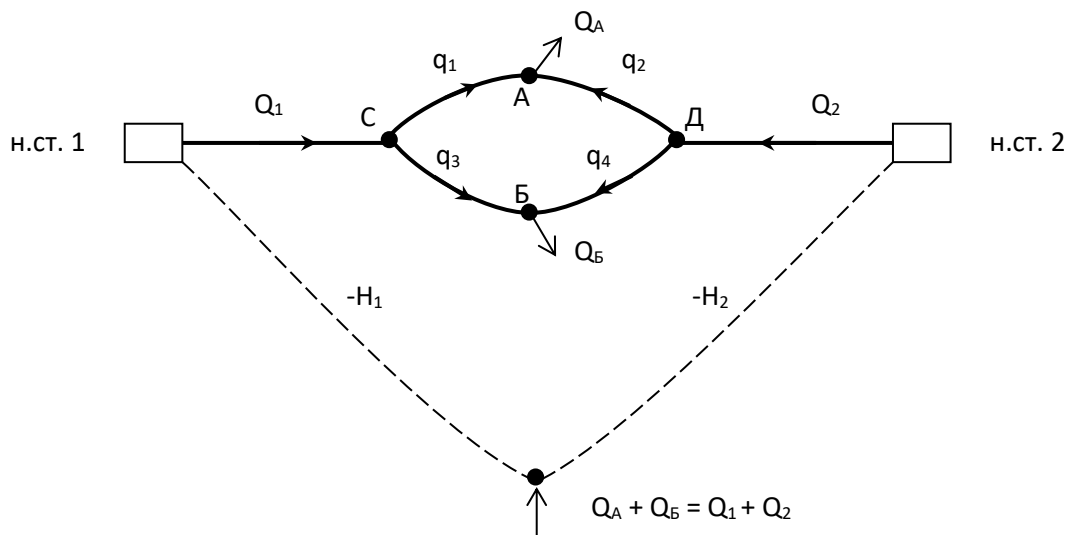


Рисунок 4.7 - Схема системи з одним кільцем і двома насосними станціями

При збереженні розглянутого вище підходу до аналізу роботи такої системи в якості головних невідомих можна прийняти подачу однієї з насосних станцій і лінійну витрату в одній з ділянок кільця, наприклад, Q_1 і q_1 , або коефіцієнт розподілу α . Для їх визначення можна використати рівняння внутрішньої і зовнішньої ув'язки. Рівняння зовнішньої ув'язки легко написати, якщо обійти фіктивний контур, що з'єднує водоживлювачі з використанням для них, функціональної залежності $H=F(Q)$. При цьому рівняння буде мати вигляд

$$-F(Q_1) + S_{н.ст.1-С} Q_1^2 + S_{CA} q_1^2 - S_{AD} q_2^2 - S_{Д-н.ст.2} Q_2^2 + F(Q_2) = 0$$

або

$$S_{н.ст.1-С} Q_1^2 + S_{CA} q_1^2 - S_{AD} q_2^2 - S_{Д-н.ст.2} Q_2^2 = F(Q_1) - F(Q_2) .$$

Рівняння внутрішньої ув'язки аналогічне приведенному для системи з живленням від двох резервуарів. Ці рівняння разом з рівнянням зовнішньої ув'язки та балансовим рівнянням

$$Q_1 + Q_2 = Q_A + Q_B .$$

дозволяє визначити вишукувані невідомі з коефіцієнтом розподілу α .

Розглянемо систему з кільцевою мережею і трьома насосними станціями (рис. 22).

Розглянемо систему з двома насосними станціями і водонапірною баштою (рис. 23).

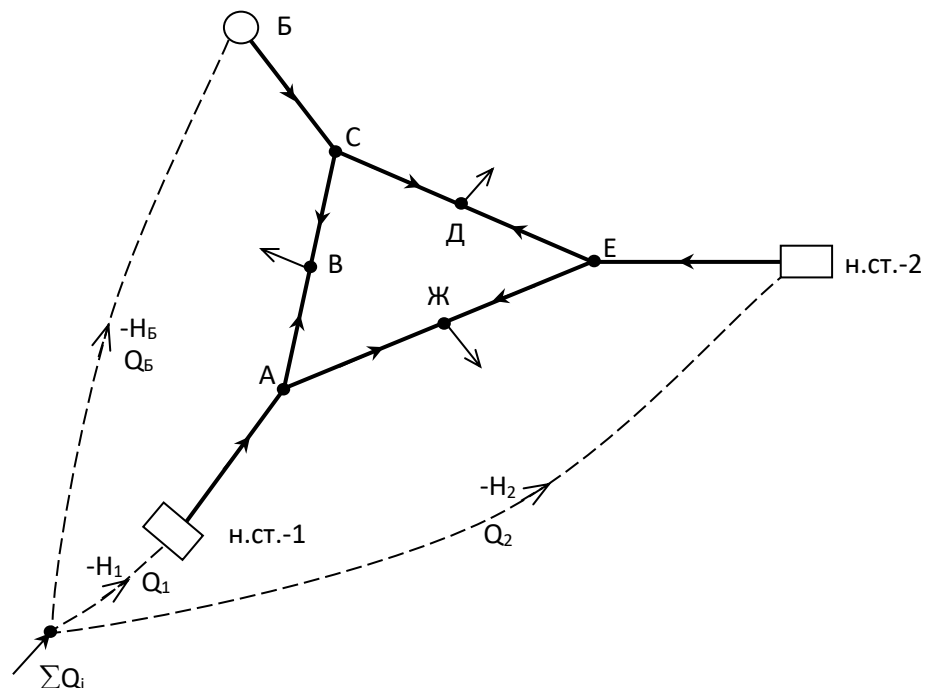


Рисунок 4.9 - Схема кільцевої мережі з двома насосними станціями і водонапірною баштою

Основними (незалежними) невідомими при аналізі такої системи будуть: подача однієї з насосних станцій і подача (або відбір) води водонапірною баштою, а також лінійна витрата однієї з ділянок кільця (чи відповідний йому коефіцієнт розподілу α). Задача розв'язується з використанням рівняння зовнішньої ув'язки. Для випадку надходження води з башти рівняння будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} -H_B + (\sum h)_{BC} + (\sum h)_{CB} - (\sum h)_{AB} - (\sum h)_{н.ст.1-A} + F(Q_1) &= 0, \\ -F(Q_1) + (\sum h)_{н.ст.1-A} + (\sum h)_{AJ} - (\sum h)_{JE} - (\sum h)_{н.ст.2-E} + F(Q_2) &= 0. \end{aligned}$$

У випадку надходження води в бак рівняння матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} -H_B - (\sum h)_{BC} - (\sum h)_{BC} - (\sum h)_{AB} - (\sum h)_{н.ст.1-A} + F(Q_1) &= 0, \\ -F(Q_1) + (\sum h)_{н.ст.1-A} + (\sum h)_{AJ} - (\sum h)_{JE} - (\sum h)_{н.ст.2-E} + F(Q_2) &= 0. \end{aligned}$$

На рис. 24 приведена система, в яку входить два замкнута контура, які яються від двох насосних станцій з двома напірно-регулюючими ємкостями. Вода ається трьома об'єктами в вузлах *A*, *B* і *V* у вигляді зосереджених витрат. Всі омі зводяться до п'яти головних (незалежних) витрат: трьох любих подач (або осованих відборів) і двох лінійних витрат (по одному для кожного кільця). Для їх чення можуть бути написані три

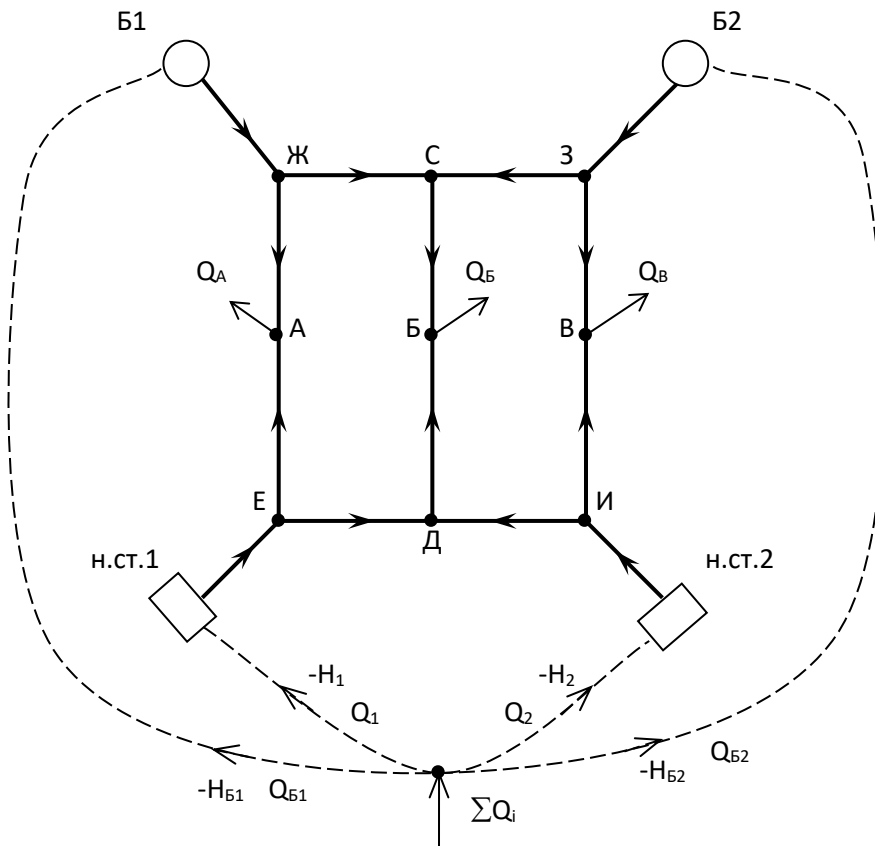


Рисунок 4.10 - Схема кільцевої мережі з двома насосними станціями і двома водонапірними баштами

рівняння зовнішньої ув'язки і два рівняння внутрішньої ув'язки.

Отримаємо такі рівняння:

- зовнішньої ув'язки:

—

$$\begin{aligned} & -H_{B1} + (\Sigma h)_{B1-A} - (\Sigma h)_{A-H.cm.1} + F(Q_1) = 0, \\ & -F(Q_1) + (\Sigma h)_{H.cm.1-D} - (\Sigma h)_{D-H.cm.2} + F(Q_2) = 0, \\ & -F(Q_2) + (\Sigma h)_{H.cm.2-B} - (\Sigma h)_{B-H.cm.} + H_{B2} = 0, \end{aligned}$$

- внутрішньої ув'язки:

—

$$\begin{aligned}(\Sigma h)_{EA} - (\Sigma h)_{AK} + (\Sigma h)_{KC} + (\Sigma h)_{CB} - (\Sigma h)_{BD} - (\Sigma h)_{ED} &= 0, \\ (\Sigma h)_{ID} + (\Sigma h)_{DB} - (\Sigma h)_{BC} - (\Sigma h)_{C3} + (\Sigma h)_{3B} + (\Sigma h)_{BI} &= 0.\end{aligned}$$

Питання для самоконтролю

1. Які варіанти розрахунку приймаються для розгалужених мереж в гідравлічних комплексах?
2. Які рівняння слід використати для розрахунку системи з двома насосними станціями і однією водонапірною баштою?
3. Які розрахункові положення приймаються для схеми системи з трьома насосними станціями і двома водонапірними баштами?
4. Яку кількість рівнянь першої групи слід використати при перевірочних розрахунках систем, які мають кількість водоживлювачів $e > 1$?
5. Яка різниця у вузлових рівняннях для схеми системи з одним кільцем і двома баштами, які подають воду в мережу?

Тема 5. Перевіркові розрахунки елементів в гідравлічних комплексах з кільцевими мережами

1. Перевірка адекватності математичної моделі потокорозподілу в реальному часі.
2. Особливості перевірочних розрахунків розгалужених мереж з одним водоживлювачем без регулюючих ємностей та їх застосування для оперативного управління.
3. Особливості перевірочних розрахунків розгалужених мереж з одним водоживлювачем та різною кількістю джерел живлення та їх застосування для оперативного управління.
4. Графічний аналіз роботи розгалуженої інженерної мережі транспортування води з двома водоживлювачами.

1. Задачею перевірочних розрахунків являється визначення дійсних витрат і тисків в усіх елементах комплексу споруд при їх сумісній роботі та заданих характеристиках окремих елементів.

Звичайно при перевірочних розрахунках відомими являються: діаметри всіх ліній системи, геодезичні позначки всіх її вузлів, гідравлічні характеристики прийнятих водоживлювачів і нефіксованих відборів. В практичних розрахунках як правило вимагається також, щоб величини вільних напорів в вузлах мережі знаходилися в певних межах.

Нехай p - загальна кількість ділянок системи, m - загальна кількість вузлів системи, в яку також включаються точки розміщення водоживлювачів та нефіксованих відборів, e - кількість водоживлювачів і нефіксованих відборів.

Невідомими в системі, яка аналізується, будуть: p лінійних витрат ділянок q_{ik} , m п'єзометричних напорів H_i в усіх m вузлах системи, e витрат водоживлювачів і нефіксованих відборів.

Тоді загальна кількість невідомих буде:

$$p + m + e,$$

з яких $p + e$ невідомих витрат і m невідомих напорів.

Для знаходження цих невідомих при сумісній роботі елементів системи в загальному випадку можуть бути складені такі групи рівнянь:

- Рівняння вигляду $\sum Q = 0$

-

$$(\sum (q_{ik} + Q_i) = 0)$$

в кількості m .

- Рівняння вигляду

-

$$P_i - P_k = h_{ik} = S_{ik} \times q_{ik}^\beta,$$

де P_i і P_k - величини п'єзометричних напорів на кінцях кожної ділянки;

h_{ik} - втрати напору на ділянці ik ,

S_{ik} - гідравлічний опір ділянки,

q_{ik} - лінійна витрата ділянки.

Кількість таких рівнянь для систем, які включають кільця і тупикові лінії, буде рівною $p-n$, де n - число кілець.

- Рівняння вигляду

-

$$\sum h_{ik} = 0 \quad \text{або} \quad \sum S_{ik} q_{ik}^\beta,$$

для всіх n кілець мережі. Ці рівняння називаються рівняннями внутрішньої ув'язки мережі.

Рівняння вигляду

$$f_1(Q) - (\sum h)_1 = f_2(Q) - (\sum h)_2,$$

які пов'язують попарно водоживлювачі і точки нефіксованих відборів при їх сумісній роботі через втрати напору в лініях, що їх з'єднують. Загальна кількість таких рівнянь буде дорівнювати $e-1$. Функції вигляду $f(Q)$ виражають напірно-витратні характеристики водоживлювачів і нефіксованих відборів. Ці рівняння можуть біти названі рівняннями "зовнішньої ув'язки" системи.

Загальне число рівнянь буде

$$m + (p - n) + n + (e - 1) = p + m + e - 1,$$

тобто на одиницю менше, ніж число невідомих. При цьому всі витрати і всі втрати напору можуть бути визначені з одержаних

$$p + m + e - 1$$

рівнянь. Не можуть бути знайденими тільки абсолютні величини п'єзометричних позначок в вузлах мережі H_i .

Рівняння другої, третьої і четвертої груп (при вже відомих витратах) дають можливість встановити зв'язок між вузловими п'єзометричними позначками, тобто дають величину втрат напору на ділянках, але не дають абсолютної величини Π_i . Отже можна одержати форму п'єзометричної поверхні, але без прив'язки її до позначок місцевості. Якщо витрати води будуть знайдені, то втрати напору, а отже і всі вузлові п'єзометричні позначки (чи напори), які визначаються, можуть бути також знайдені (якщо один із них буде відомим).

В окремих випадках для знаходження всіх невідомих витрат достатньо рівнянь першої групи, тобто лінійних рівнянь. В загальному випадку число невідомих втрат дорівнює $p + e$, число рівнянь першої групи m . Цих рівнянь буде досить для визначення всіх витрат при умові, що

$$p + e = m.$$

Враховуючи, що для всякої плоскої мережі

$$p = n + m - 1,$$

число невідомих витрат може бути рівним числу рівнянь першої групи при умові:

$$n + m - 1 + e = m \quad \text{або} \quad n + e = 1.$$

Останнє рівняння можливе тільки коли $n=0$. В цьому випадку $e=1$, що справедливо для розгалуженої мережі.

Таким чином, визначити всі витрати, користуючись тільки рівняннями першої групи, можна тільки при тупикових мережах без нефіксованих відборів і з одним джерелом живлення.

При відомих витратах ділянок втрати напору в них можуть бути обчислені незалежно для кожної ділянки, після чого можна встановити зв'язок між п'єзометричними напорами всіх вузлів мережі.

В системах з одним джерелом живлення і фіксованими відборами води сума всіх цих відборів завжди дорівнює подачі водоживлювача. Отже в цьому випадку подача водоживлювача стає величиною відомою, число невідомих зменшується на 1 і одне з рівнянь вигляду $\sum Q_{\text{вузл}}=0$ перетворюється в тотожність. В цих випадках по напірно-витратній характеристиці водоживлювача при відомій подачі можна визначити напір.

Якщо в системі, що розглядається, буде співвідношення $p+e>m$ (або, що те ж саме, $n+e>1$), рівнянь першої групи недостатньо для визначення невідомих витрат. Це може мати місце як при $e>1$, тобто при наявності кількох джерел живлення, так і при $n>0$, тобто при наявності в мережі замкнутих контурів (кілець).

Таким чином, для загального випадку розрахунку змішаних мереж, які включають кільця і тупикові лінії, необхідно мати всі рівняння чотирьох груп. Для змішаних мереж з одним джерелом живлення зникають рівняння четвертої групи (рівняння зовнішньої ув'язки). Для розгалужених мереж з кількома джерелами

живлення і нефіксованими відборами зникають рівняння третьої групи (рівняння внутрішньої ув'язки).

2. Розглянемо систему з фіксованими відборами і одним водоспоживачем, яким може бути насосна станція або напірний резервуар (рис. 7).

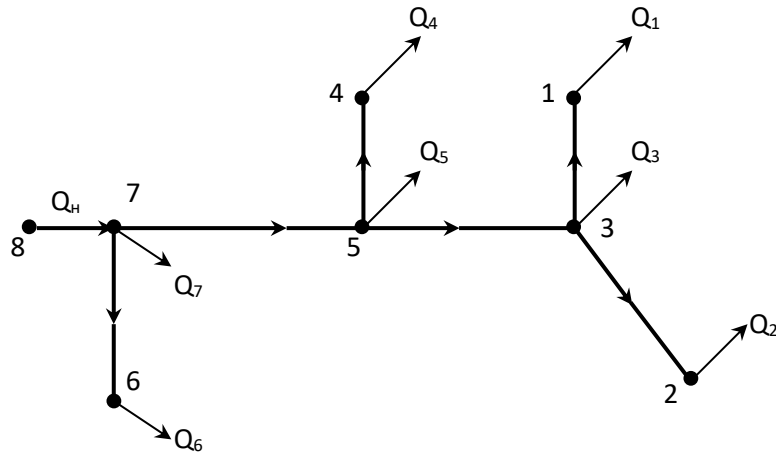


Рисунок 5.1 - Розрахункова схема безбаштової водопровідної мережі

При аналізі роботи такої мережі відомими являються діаметри і довжини (а отже і їх гідравлічний опір) ліній, фіксовані відбори в вузлах Q_i , характеристика $Q-H$ водоживлювача, геодезичні позначки всіх вузлів мережі Z_n і насоса. Необхідно визначити лінійні витрати ділянок q_{ik} , подачу води водоживлювачем Q_n і вузлові напори в усіх вузлах H_i загальним числом m , включаючи напір, який створюється водоживлювачем H_n .

Вільні напори H_{ei} при відомих напорах Π_i і позначках землі Z_i визначають за формулою:

$$H_{ei} = \Pi_i - Z_i .$$

Загальна кількість витрат, які необхідно знайти, буде

$$p+e = p + l,$$

а число напорів, які визначаються - m .

Загальна кількість невідомих буде

$$p + e + m = p + m + 1.$$

Для визначення цих невідомих може бути складено m рівнянь першої групи (у вигляді $\sum Q_{вузл} = 0$) і p рівнянь другої групи (у вигляді $\Pi_i - \Pi_k = h_{ik} = \sum S_{ik} q_{ik}^2 = 0$), тобто всього $m+p$ рівнянь.

В системі, що розглядається, для визначення всіх витрат достатньо рівнянь першої групи, бо їх число дорівнює числу невідомих, які визначаються, тобто

$$m = p + e .$$

Для мережі, яка приведена на рис.7, маємо $m = 8$, $p = 7$, $e = 1$. Тоді $8 = 7 + 1$. Якщо почати обчислювати витрати на ділянках мережі з кінця її, то одержимо

$$\begin{aligned} q_{1-3} - Q_1 &= 0, & q_{1-3} &= Q_1; \\ q_{2-3} - Q_2 &= 0, & q_{2-3} &= Q_2; \\ q_{5-3} - q_{1-3} - q_{2-3} - Q_3 &= 0, & q_{5-3} &= Q_1 + Q_2 + Q_3; \\ q_{4-5} - Q_4 &= 0, & q_{4-5} &= Q_4; \\ q_{7-5} - q_{5-3} - q_{4-5} - Q_5 &= 0, & q_{7-5} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5; \\ q_{7-6} - Q_6 &= 0, & q_{7-6} &= Q_6; \\ q_{7-8} - q_{7-5} - q_{7-6} - Q_7 &= 0, & q_{7-8} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = \sum_{i=1}^7 Q_i \\ & & Q_n &= \sum_{i=1}^7 Q_i . \end{aligned}$$

Для визначення m невідомих вузлових напорів використовуються рівняння другої групи в кількості p , яких на одиницю менше, ніж невідомих. Якщо врахувати, що для системи з одним джерелом живлення і фіксованими відборами подача насоса завжди дорівнює сумі відборів води споживачами, то $Q_n = \sum Q_i$. Тоді при відомій напірно-витратній характеристиці насоса по ній можна визначити величину напору, який буде створювати насос при подачі витрати Q_n . Інші вузлові напори визначаються з використанням рівнянь другої групи вигляду

$$P_i - P_k = S_{ik} q_{ik}^2 .$$

Вільні напори визначаються за формулою:

$$H_{vi} = P_i - Z_i .$$

Після визначення вільних напорів необхідно пересвідчитись, що вони знаходяться в необхідних межах. Якщо виявиться, що при водоживлювачеві, який було намічено для використання, величини вільних напорів в диктуючих точках системи будуть меншими від необхідних, то слід взяти насос з більшим напором і навпаки. При цьому зміна водоживлювача не впливає на витрати на ділянках і на втрати напору в них, а лише впливає на вузлові напори. П'єзометричні лінії при заміні водоживлювачів піднімаються або опускаються паралельно самі собі на одну і ту ж величину в кожному вузлі.

При використанні напірного резервуару як водоживлювача відмінність від розглянутого вище розрахунку буде полягати лише в тому, що не тільки подача води з резервуару буде завжди дорівнювати сумі відборів з мережі, але і напір у водоживлювача буде постійним ($H_e = const$) і незалежним від подачі.

3. Розглянемо систему з розгалуженою мережею і двома насосними станціями, які подають в неї воду (рис. 8). При перевірочних розрахунках всі фіксовані відбори, геодезичні позначки всіх вузлів системи і гідравлічні опори всіх ліній відомі. Напірно-витратні характеристики обох насосних станцій також відомі або підібрані за попередніми міркуваннями. На відміну від системи з одним водоживлювачем витрати і напрями руху води в головній магістралі можуть змінюватися в залежності від характеристики *водоживлювача*.

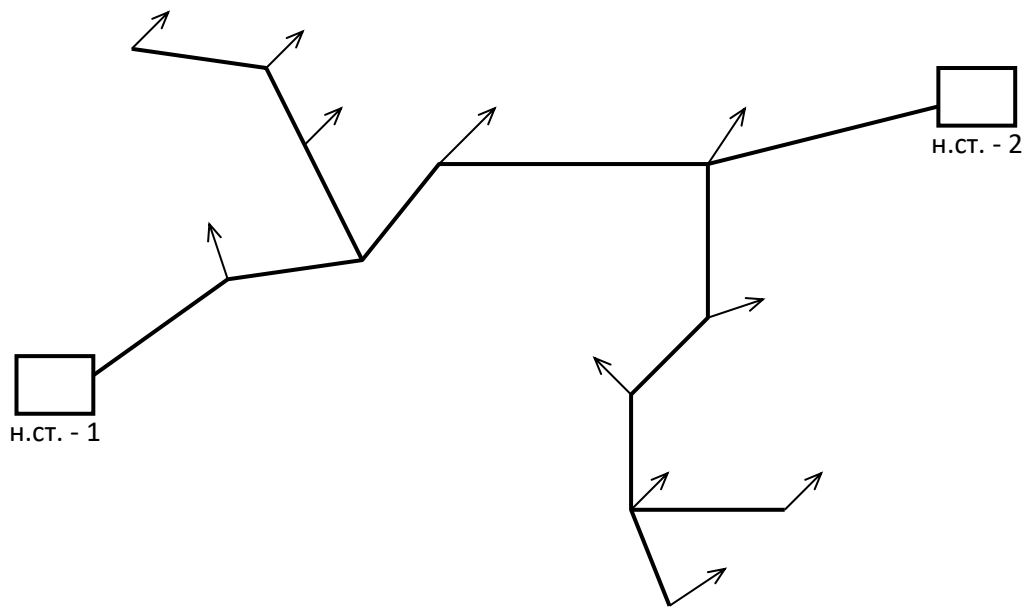


Рисунок 5.2 - Розгалужена безбаштова мережі з подачею води двома насосними станціями

Загальні витрати в відгалуженнях залежать від вузлових витрат, до яких вони підводять воду. Якщо вузлові витрат фіксовані, то аналіз роботи відгалуження виконується так, як і розгалуженої мережі з одним водоживлювачем. Тому особливості аналізу роботи системи, яка приведена на рис.8, можна розглянути на спрощеній схемі (рис.9). На цій схемі відбори відгалужень замінені фіксованими зосередженими відборами в вузлах, в яких ці відгалуження приєднуються до головної магістралі і які за величиною дорівнюють загальній витраті відгалуження.

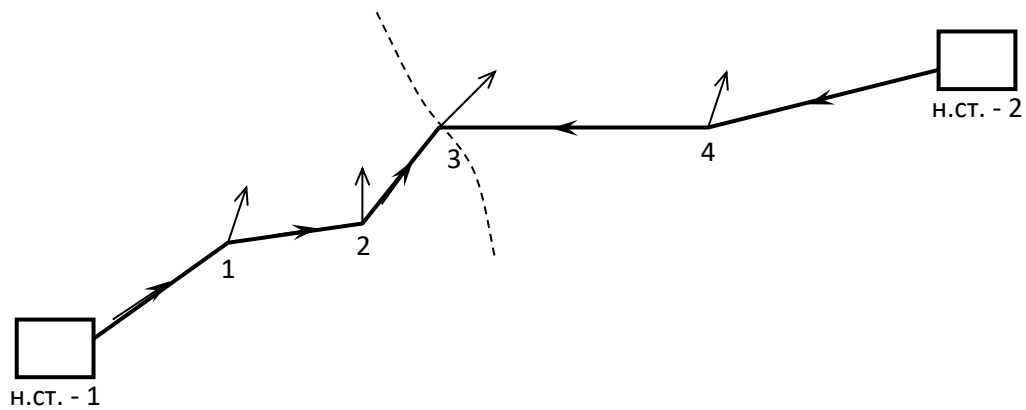


Рисунок 5.3 - Розрахункова схеми мережі

Кількість невідомих витрат в схемі, яка аналізується, буде $p+e$, де p - кількість лінійних витрат q_{ik} , e - кількість невідомих подач водоживлювачів Q_{ni} ($e=2$).

Кількість невідомих вузлових напорів H_i дорівнює числу вузлів системи m (з врахуванням вузлів з водоживлювачами).

Тоді загальне число невідомих буде

$$p + e + m$$

або для системи, що розглядається,

$$5 + 2 + 6 = 13.$$

Для їх знаходження можна використати m рівнянь першої групи у вигляді $\sum Q_n = 0$ для всіх вузлів, p рівнянь другої групи у вигляді

$$H_i - H_k = S_{ik} q_{ik}^2$$

для всіх ділянок, $e-1$ рівнянь четвертої групи, тобто всього 12 рівнянь.

В цьому випадку рівнянь першої групи для визначення всіх витрат буде недостатньо тому, що

$$p + e > m \quad (5+2 > 6)$$

В мережі з двома джерелами живлення невідомі величини подач водоживлювачів Q_1 і Q_2 , тобто невідомою являється межа “зон живлення” системи окремими водоживлювачами.

Лінійні витрати пов'язані з подачею насосних станцій залежністю

$$Q_1 + Q_2 = \sum Q_i.$$

Другою парою головних невідомих являються напори H_1 і H_2 , які створюються водоживлювачами при їх сумісній роботі. Вони пов'язані з витратами з витратами Q_1 і Q_2 співвідношеннями

$$H_1 = F(Q_1) \text{ та } H_2 = F(Q_2),$$

які задаються характеристиками намічених до використання насосів. Для знаходження чотирьох головних невідомих Q_1 , Q_2 , H_1 і H_2 не вистачає одного рівняння. Таким рівнянням може бути рівняння зовнішнього ув'язки

$$H_1 - \sum (S_{ik} q_{ik}^2)_1 = H_2 - \sum (S_{ik} q_{ik}^2)_2.$$

Величини сумарних втрат напору в першій і другій зонах живлення можуть бути знайдені в функції невідомих величин Q_1 і Q_2 . Тоді рівняння зовнішньої ув'язки можна представити у вигляді залежності

$$F_1(Q_1) - f_1(Q_1) = F_2(Q_2) - f_2(Q_2).$$

Сумісне розв'язування наведених вище рівнянь дає можливість визначити Q_1 , Q_2 , H_1 і H_2 . Коли Q_1 і Q_2 визначено, всі інші невідомі витрати в лініях мережі легко визначаються з рівнянь першої групи. Після чого неважко визначити всі напори в усіх вузлах системи.

Система рівнянь може розв'язуватись аналітично або графічно. При розв'язуванні задачі необхідно попередньо намітити можливі області живлення системи від насосів і знайти залежність величин $(\sum h)_1$ і $(\sum h)_2$ від відповідних подач насосів Q_1 і Q_2 . Для цього намічається точка сходу потоків і розраховуються характеристики трубопроводів в кожній із зон по залежності $\sum S_{ik} q_{ik}^2$. Визначені таким чином втрати напору $(\sum h)_1$ і $(\sum h)_2$ вираховуються з ординат характеристик $(Q - H)$ насосів 1 і 2 відповідно. Враховуючи те, що сумарна подача обох насосів завжди дорівнює сумі відборів з мережі $\sum Q_i$, графічне розв'язування задачі починається з будування характеристик кожного з насосів на кінцях відрізка вісі абсцис, який дорівнює $\sum Q_i$ (рис. 10).

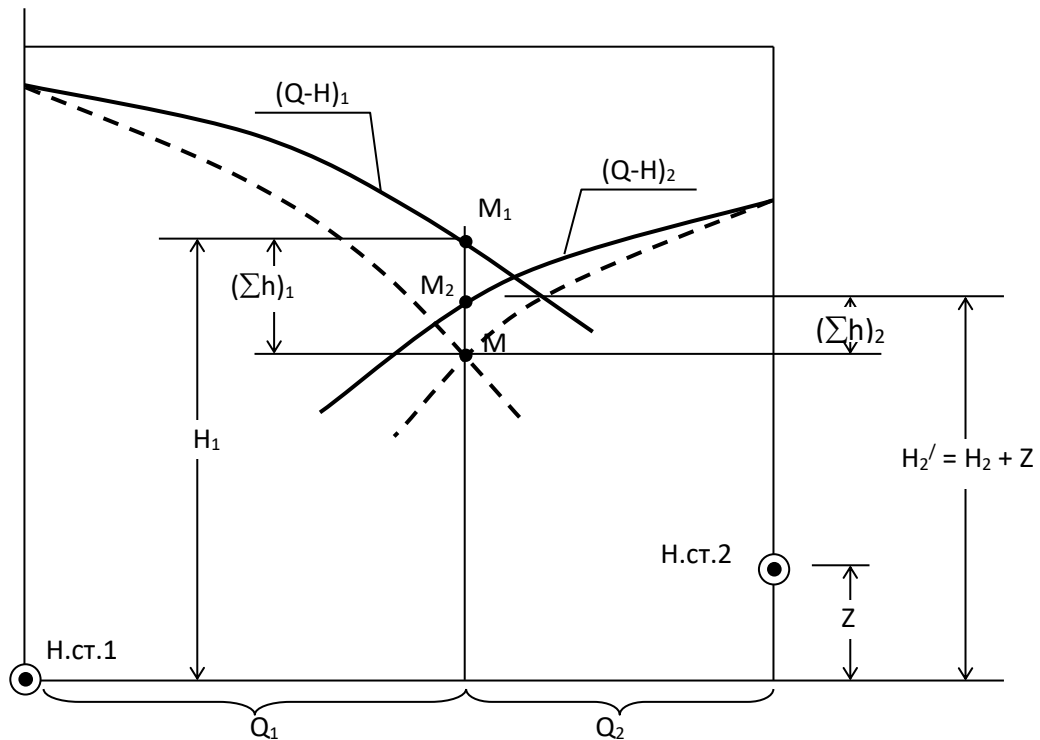


Рисунок 5.4 - Графічний аналіз роботи розгалуженої мережі з двома водоживлювачами

4. Після вирахування відповідних витрат напору з ординат кожної з характеристик буде одержано дві нові характеристики насосів, які показано пунктиром. Їх перетин між собою дає точку M , яка визначає величини подач кожного з насосів Q_1 і Q_2 . Ординати точок M_1 і M_2 характеристик $(Q-H)_1$ і $(Q-H)_2$, які відповідають абсцисі точки M , дають напори насосів H_1 і H_2 відносно вісі насосної станції N_1 . Різниця ординат M_1 і M дає величину $(\Sigma h)_1$, а ординат M_2 і M - $(\Sigma h)_2$. Інші величини q_{ik} і h_{ik} можуть бути легко знайдені за допомогою рівнянь першої та другої групи.

Подібний метод перевірконого розрахунку безбаштових розгалужених мереж з двома джерелами живлення може бути розповсюдженим і на системи з любым числом насосних станцій. При збільшенні числа насосних станцій буде відповідно зростати число невідомих величин подачі насосів Q_n . Тому для визначення всіх невідомих витрат до рівняння першої групи необхідно додавати рівняння “зовнішньої ув’язки” в кількості $e-1$.

Наприклад, для мережі з трьома насосними станціями необхідно буде два рівняння “зовнішньої ув’язки”:

$$H_1 - (\Sigma h)_1 = H_2 - \Sigma(h)_2$$

$$\text{I } H_1 - (\Sigma h)_1 = H_3 - \Sigma(h)_3 ,$$

які можна представити у вигляді

$$F(Q_1) - f(Q_1) = F(Q_2) - f(Q_2)$$

$$i F(Q_1) - f(Q_1) = F(Q_3) - f(Q_3),$$

де Q_1 , Q_2 і Q_3 - невідомі подачі насосів;

H_1 , H_2 і H_3 - відповідні їм напори насосів;

$(\sum h)_1$, $(\sum h)_2$, $(\sum h)_3$ - сумарні втрати напорів в зонах мережі, які живляться від відповідних насосних станцій.

Ці два рівняння “зовнішньої ув’язки” разом з основним “балансовим рівнянням”

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = \sum Q_i$$

складають систему рівнянь для визначення всіх невідомих витрат Q_1 , Q_2 і Q_3 .

Межа зон живлення уточнюється в процесі розрахунку. Задача може розв’язуватись графічно чи аналітично. В усіх розглянутих системах замість окремих насосних станцій можуть бути напірні резервуари або природні водосховища, які використовуються як водоживлювачі (при умові, що вони не можуть перетворитись в нефіксовані відбори). При цій умові розрахунок систем з такими резервуарами залишається таким же, як і з насосними станціями з тією різницею, що для фіктивних ліній, які з’єднують вузол “0” з напірним резервуаром, характеристика буде мати вигляд $H = \text{const}$. Схема розрахунку з фіктивними контурами відтворює схему електромоделювання системи водопостачання.

Питання для самоконтролю

1. Які завдання вирішуються при виконанні перевірочних розрахунків?
2. Які розрахункові параметри є відомими при розрахунках схеми безбаштової водопровідної мережі?
3. Чому дорівнює кількість невідомих витрат при розрахунку розгалуженої безбаштової мережі з подачею води двома насосними станціями?
4. В яких випадках виконуються рівняння зовнішньої ув’язки?

Тема 6. Особливості гідравлічних комплексів систем очищення речовин, що транспортуються

1. Аналіз гідравлічних характеристик елементів систем систем очищення речовин, що транспортуються.
2. Перевірка адекватності математичної моделі систем очищення речовин, що транспортуються.
3. Особливості перевірочних розрахунків напірних елементів систем водовідведення та їх застосування для оперативного управління.
4. Особливості перевірочних розрахунків безнапірних елементів систем водовідведення та їх застосування для оперативного управління.

1. Гідравлічні характеристики елементів систем водовідведення

Основними елементами систем водовідведення, які пов'язані в єдиний гідравлічний комплекс, являються:

- лінії, які відводять стоки - напірні колектори, ділянки самопливної мережі;
- приймачі стічних вод;
- ємності-регулятори;
- елементи, які перекачують стоки - насоси, пневматичні установки.

Гідравлічні характеристики напірних елементів систем водовідведення аналогічні характеристикам відповідних елементів систем водопостачання. Разом з тим при однаковій структурі цих характеристик вони повинні враховувати особливості систем водовідведення. Так, наприклад, напірні колектори мають такі ж характеристики, як і водоводи, тобто,

$$P_i - P_k = h_{ik} = S_{ik} Q_{ik}^2 .$$

Проте, якщо в водопровідних мережах в певних випадках швидкість руху води може бути невеликою ($<0,7$ м/с), то в системах водовідведення така швидкість дуже не бажана, а якщо вона має місце, то необхідно використовувати спеціальні міри для промивки ліній. Крім того, гідравлічні характеристики напірних колекторів систем водовідведення мають більшу залежність від терміну експлуатації.

На відміну від систем водопостачання в системах водовідведення немає водоживлювачів у вигляді резервуарів (за виключенням очисних споруд). Характеристики ***Q-H*** багатьох каналізаційних насосів в межах області, яка рекомендується для їх використання, близькі до прямої, тобто, така ділянка характеристики може бути описана рівнянням прямої

$$H = a_0 - a_1 Q_1 ,$$

де a_0 і a_1 - коефіцієнти, які визначаються з графічної характеристики.

Для крайніх точок робочої ділянки

$$\begin{cases} H_1 = a_0 - a_1 Q_1 , \\ H_2 = a_0 - a_1 Q_2 . \end{cases}$$

Звідки

$$a_1 = \frac{H_1 - H_2}{Q_2 - Q_1} ; \quad a_0 = H_1 + \frac{H_1 - H_2}{Q_2 - Q_1} Q_1 .$$

Пневматичні установки, які використовуються для перекачки стоків, мають гідравлічні характеристики, що подібні водопровідним, тобто,

$$P_{abc} W = const.$$

Стічні води надходять в систему водовідведення через санітарні прилади. Самопливний режим роботи в системах водовідведення послаблює взаємний зв'язок витрати і напору, і для більшості санітарних приладів ним можна знехтувати. В цьому випадку характеризувати санітарні прилади можна витратами води з них Q_{np} і їх висотою розміщення відносно точки приєднання до мережі або абсолютною позначкою Z_{np} .

В окремих випадках (наприклад, для приймачів стічних вод промислових підприємств) враховується пропускна здатність системи водовідведення з приладу

$$H_{np} = S_{ov} Q_{np}^2,$$

де S_{ov} - опір системи водовідведення від приладу;

Q_{np} - витрата води від приладу.

Ємності - регулятори в залежності від задач, які розв'язуються, можна описати напірно-витратною характеристикою вигляду

$$H = Z_{pv} - S Q^2,$$

де Z_{pv} - позначка рівня води в ємності;

S - опір системи водовідведення;

Q - витрата, яка відбирається з ємності.

або витратно-тривалісною характеристикою

$$t = W / Q,$$

де W - об'єм ємності;

t - термін спорожніння (наповнення);

Q - витрата спорожнення (наповнення).

Ділянки самопливної мережі характеризуються ухилом, який забезпечує необхідну пропускну можливість для відводу стоків при необхідному наповненні. Аналітичне описання характеристики самопливної лінії буде мати вигляд

$$Z_k = Z_n - h_{em} = Z_n - il = Z_n - \frac{q^2 l}{w^2 c^2 R} = Z_n - K^2,$$

де Z_k і Z_n - позначки рівня води (або лотка) в кінці і на початку ділянки відповідно;

l - довжина ділянки;

q - витрата ділянки;
 w - площа живого перерізу потоку;
 c - коефіцієнт Шезі;
 R - гідравлічний радіус;
 K - модуль витрати трубопроводу.

.2. Задачі перевірочних розрахунків комплексу водовідведення

Головна ціль перевірочних розрахунків - визначення необхідних заходів в системі водовідведення для забезпечення її нормальної роботи в умовах зміни надходження стоків.

Витрата стоків може як збільшуватися, так і зменшуватись. Збільшення витрати стоків пов'язано із збільшенням кількості населеного пункту і з розширенням промислових підприємств. При цьому необхідно врахувати також, що на параметри системи водовідведення впливає не тільки величина витрати, але і місце розташування зони зміни витрати в системі. Так, наприклад, якщо зона зміни витрати знаходиться на початку мережі, то це позначиться практично на всіх її ділянках від цієї зони до очисних споруд або до випуску. Якщо зона збільшення витрати буде знаходитися в кінці мережі, то це позначиться тільки на кінцевих ділянках колектору, на очисних спорудах і на випуску. На характеристики мережі впливає не тільки місце розташування зон зміни витрат, але і зміна інтенсивностей надходження стоків (наприклад, при реконструкції району з заміною забудови будинками з більшою кількістю поверхів). В цьому випадку змінюються витрати стоків, які надходять від бокових приєднань, а отже і зосереджені витрати в колектори.

В мережі водовідведення необхідно враховувати не тільки збільшення, але і зменшення витрат тому, що таке зменшення приводить до зменшення швидкостей, збільшення відкладень в трубах і збільшення кількості засмічень трубопроводів. Зменшення витрат може мати місце в зв'язку із зміною напряму забудови міста, перепланування міста, зміною структури промисловості, вимогами охорони навколишнього середовища.

Перевірочні розрахунки також необхідні при підключенні до мережі нових колекторів. Таким чином, загальні задачі перевірочних розрахунків комплексу водовідведення зводяться до наступних задач:

- Перевірка можливостей пропуску по існуючим мережам збільшеної витрати стоків.
- Визначення діаметрів додаткових колекторів.
- Перевірка можливості підключення додаткових колекторів до існуючих мереж.
- Перевірка можливостей перекачки додаткових витрат води.
- Реконструкція станцій, які перекачують стоки.
- Реконструкція очисних споруд.

.3. Перевірочні розрахунки напірних елементів систем водовідведення

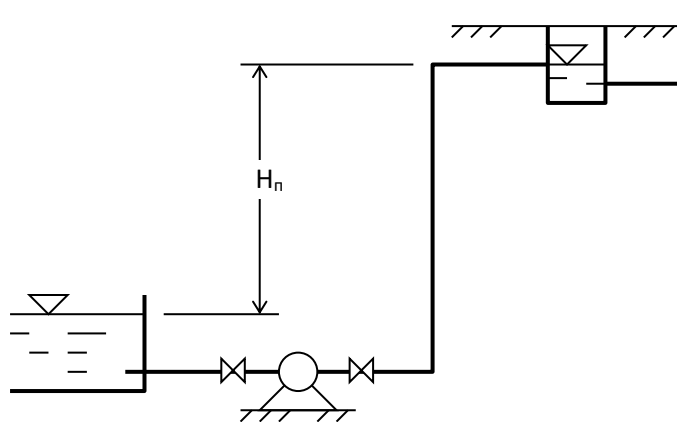
До напірних елементів систем водовідведення відносяться: напірні колектори, насоси, пневматичні установки, дюкери, гравітаційні трубопроводи очисних споруд. В усіх цих елементах характеристики в кінцевому рахунку можуть бути представлені

у вигляді $H=f(Q)$. В зв'язку з цим основні типи задач зводяться до визначення максимальної витрати, яку може пропускати система, що аналізується, при заданому перепаді напорів або до визначення необхідного напору для пропуску заданої витрати.

Можливість збільшення пропускної можливості системи “насос - напірний колектор” базується на тому, що насоси насосних станцій систем водовідведення мають запаси продуктивності. Тому стійкість системи досягається за рахунок переміщення робочої точки.

Розглянемо схему роботи насосу на напірний колектор (рис. 25). Така схема використовується при необхідності зменшення глибини прокладки самопливного колектору та при перекачці стоків на очисні споруди.

Напір, який повинен розвивати насос, визначається за формулою:



$$H_n = H_n + \sum h_k,$$

де H_n - геометрична висота підйому;
 $\sum h_k$ - сумарні втрати напору в комунікаціях.

Рисунок 6.1 - Схема перекачки стічних вод

$$\begin{aligned} \sum h_k &= h_{\text{дов}} + h_m = S_n Q^2 + \sum h_{mn} + S_{\text{вс}} \frac{Q^2 v_{\text{вс}}^2}{2g} \sum \xi_{\text{вс}} \sum h_{\text{мвс}} = \\ &= (1,1 \div 1,15) S_n Q^2 + S_{\text{вс}} Q^2 + \end{aligned}$$

де S_n і $S_{\text{вс}}$ - опір напірного і всмоктувального трубопроводів відповідно;
 $\sum h_{mn}$ і $\sum h_{\text{мвс}}$ - сумарні втрати на місцевий опір відповідно в напірному і всмоктувальному трубопроводі;

$v_{\text{вс}}$ - швидкість у всмоктувальному трубопроводі.

З другого боку напір насосу визначається виразом

$$H_n = a_0 - a_1 Q.$$

Ці рівняння дозволяють розв'язувати як пряму, так і зворотну задачу, тобто знайти H_n або Q_n . Таке рішення можливе, якщо в верхньому колодязі або приймальному резервуарі мається залишковий напір насосів. Тоді із збільшення подачі робоча точка насосів буде переміщуватися по характеристиці $Q-H$ насосів, а залишковий напір буде знижуватись.

Якщо залишковий напір в колодязі - гасителі недостатній, то необхідна подача може бути досягнута за рахунок збільшення рівня рідини в приймальному резервуарі

насосної станції. Коли це неможливо, то збільшення пропускної здатності системи “насос - напірний колектор” може бути досягнуто за рахунок зниження опору комунікацій.

Розглянемо сумарні втрати напору в комунікаціях

$$\sum h_k = h_{\text{дов}} + h_m = S_n Q^2 + S_{\text{вс}} Q^2 + \sum \xi \frac{v_n^2}{2g} + \sum \xi \frac{v_{\text{вс}}^2}{2g}.$$

Для одного робочого насоса $Q_{\text{вс}} = Q_n$. Тоді

$$\begin{aligned} \sum h_k &= S_n Q^2 + \frac{8Q^2}{\pi^2 D_n^4 g} \sum \xi_n + S_{\text{вс}} Q^2 + \frac{8Q^2}{\pi^2 D_{\text{вс}}^4 g} \sum \xi_{\text{вс}} = \\ &= \left(S_n + \frac{k}{D_n^4} \sum \xi_n + S_{\text{вс}} + \frac{k}{D_{\text{вс}}^4} \sum \xi_{\text{вс}} \right) Q^2 = S_k Q^2. \end{aligned}$$

Припустимо, що витрата стоків зросла в α разів. Тоді, для того, щоб напір насосів не збільшувався втрати напору в комунікаціях не повинні зростати, тобто

$$\sum h_{k1} = \sum h_{k2}.$$

Підставимо нове значення витрат в це рівняння. Одержимо

$$\begin{aligned} S_{k1} Q^2 &= S_{k2} (\alpha Q^2), \\ S_{k1} Q^2 &= S_{k2} \alpha^2 Q^2. \end{aligned}$$

Звідки

$$S_{k2} = S_{k1} / \alpha^2$$

або

$$\sum h'_{k2} = \sum h_{k1} / \alpha^2.$$

Представимо цей вираз через довжину колектора. Для цього розглянемо дві можливі схеми напірних колекторів (рис. 26).

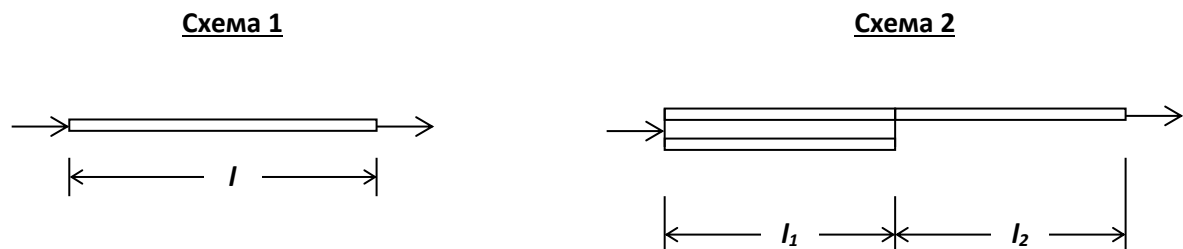


Рисунок 6.2 - Схема напірних колекторів

Припустимо, що зниження загального опору системи досягається паралельним підключенням колектора такого ж діаметру довжиною l_1 . Тоді буде справедливим рівняння

$$\sum h_{cx2} = \sum h_{l_1} + \sum h_{l_2},$$

де $\sum h_{l_1}$ і $\sum h_{l_2}$ - сумарні втрати колекторів довжиною l_1 і l_2 відповідно.

Виразимо сумарні втрати напору через довжину, витрату і кількість колекторів.

Тоді

$$1,1 S_0 l \frac{Q^2}{n^2} = 1,1 S_0 l_1 \frac{\alpha^2 Q^2}{n_1^2} + 1,1 S_0 l_2 \frac{\alpha^2 Q^2}{n^2},$$

$$\frac{1}{n^2} l = \frac{\alpha^2}{n_1^2} l_1 + \frac{\alpha^2}{n^2} l_2.$$

$$\frac{1}{n^2} l = \frac{\alpha^2}{n_1^2} l_1 + \frac{\alpha^2}{n^2} (l - l_1);$$

$$l_2 = l - l_1;$$

$$\frac{1}{n^2} l = \frac{\alpha^2}{n_1^2} l_1 + \frac{\alpha^2}{n^2} l - \frac{\alpha^2}{n^2} l_1;$$

$$\left(\frac{1}{n^2} - \frac{\alpha^2}{n^2} \right) l = \left(\frac{\alpha^2}{n_1^2} - \frac{\alpha^2}{n^2} \right) l_1.$$

Звідки

$$l_1 = \frac{1-\alpha^2}{\alpha^2} \times \frac{n_1^2}{n^2-n_1^2} l,$$

де α - співвідношення витрат

$$\alpha = Q_1 / Q,$$

Q_1 і Q - збільшена і існуюча витрата відповідно,
 n_1 і n - кількість колекторів на різних ділянках.

Ця ж формула дозволяє визначити, яку частину одного з паралельних колекторів корисно відключити для підтримання необхідного режиму при зменшенні витрати, яка надходить. Однак це не позбавляє від необхідності в окремих випадках прийняття мір в зв'язку зі зниженням швидкості руху стоків в тій частині колекторів, які залишаються.

Пневматичні установки при перекачці стічних вод працюють в циклічному режимі: наповнення приймальної ємності - витискування стоків повітрям. Перший цикл - *самопливний*, і збільшення витрати, яка надходить, впливає тільки на зменшення його терміну. Другий цикл - *напірний*. В цьому циклі збільшення витрати стоків приводить до зростання втрат напору в напірному трубопроводі і до збільшення тиску компресора. Ці зміни визначаються наступними співвідношеннями:

- втрати напору в напірному трубопроводі до зміни витрати дорівнюють

$$h_1 = S_1 Q_1^2 ;$$

- втрати напору в цьому ж трубопроводі при зміні витрат в α разів будуть

$$h_2 = S_1 \alpha^2 Q_1^2 ;$$

- відносна зміна втрат напору складе

$$h_2 / h_1 = \alpha^2 ;$$

- повний напір, який повинен забезпечувати компресор з врахуванням змін буде

$$H = H_n + \alpha^2 h_1 ,$$

де H_n - частина загального напору, яка необхідна для підймання стоків на висоту між позначкою рівня рідини в приймальному колодязі і позначкою дна ємності апарату.

При значному зростанні втрат напору збільшення пропускної можливості може бути забезпечено збільшенням діаметра напірного трубопроводу або прокладкою додаткового трубопроводу.

Наступним напірним елементом являються дюкери. Втрати напору в дюкері до зміни витрати визначаються рівнянням

$$h_1 = S Q^2 + \sum \xi \frac{v^2}{2g} = S Q^2 + \frac{8 Q^2}{\pi^2 D^4 g} \sum \xi = \left(S + \frac{8}{\pi^2 D^4 g} \sum \xi \right) Q^2 .$$

При зміні витрати в α разів втрати напору зростають до величини

$$h_2 = \left(S + \frac{8}{\pi^2 D^4 g} \sum \xi \right) \alpha^2 Q^2 ,$$

тобто зміна складає

$$h_2 / h_1 = \alpha^2 .$$

Збільшення втрат напору приводить до підтоплення верхньої камери і трубопроводу, який підводить стоки, а зменшення їх - до зниження швидкості руху стоків, яка не повинна бути меншою 1 м/с.

Аналогічні характеристики мають і гравітаційні трубопроводи очисних споруд. Заходи, які пов'язані з цими змінами, залежать від конкретних умов їх експлуатації.

4. Перевірочні розрахунки безнапірних елементів систем водовідведення

До безнапірних елементів систем водовідведення відносяться: самопливні вуличні мережі і колектори, самопливні лотки, ємності-регулятори.

Безнапірні елементи, як і напірні, характеризуються залежностями вигляду $h=f(Q)$, які однаке в системах водовідведення трансформуються у залежність

$$h = i l ,$$

де i - ухил трубопроводу;

l - довжина трубопроводу.

Враховуючи це, основні типи перевірочних задач зводяться до перевірки можливостей підключення до діючих мереж нових ділянок трубопроводів і до перевірки величин параметрів потоку після зміни витрат, які були на початку. В ємностях-регуляторах, крім гідравлічних параметрів, перевіряються також часові або об'ємні параметри.

Задачі перевірки можливостей підключення нових мереж до діючих розглядаються в двох аспектах:

- перевірка можливостей підключення до колодязя з відомою позначкою лотка при збереженні потрібного гідравлічного режиму в новій мережі;
- перевірка можливості пропуску збільшеної витрати стоків існуючими мережами.

Перший тип задачі передбачає перевірку умови

$$Z_{max} = Z_{поч} - il \geq Z_{л} ,$$

де Z_{max} - максимально висока можлива позначка лотка труби нової мережі в місці підключення, тобто, позначка лотка, яка буде в тому випадку, коли початкова глибина закладки і ухил прийняті мінімально допустимими;

i - мінімальний ухил лотка труби, який забезпечує допустиме наповнювання труби і швидкість руху рідини в ній;

l - довжина мережі;

$Z_{л}$ - позначка лотка існуючої мережі в місці підключення;

$Z_{поч}$ - позначка лотка на початку ділянки

$$Z_{поч} = Z_{нов.з} - h_{поч} ,$$

$Z_{нов.з}$ - позначка поверхні землі на початку ділянки;

$h_{поч}$ - початкове заглиблення лотка на початку ділянки.

Ця задача в залежності від того, що доцільніше перевіряти, може зводитись до перевірки таких умов (рис. 6):

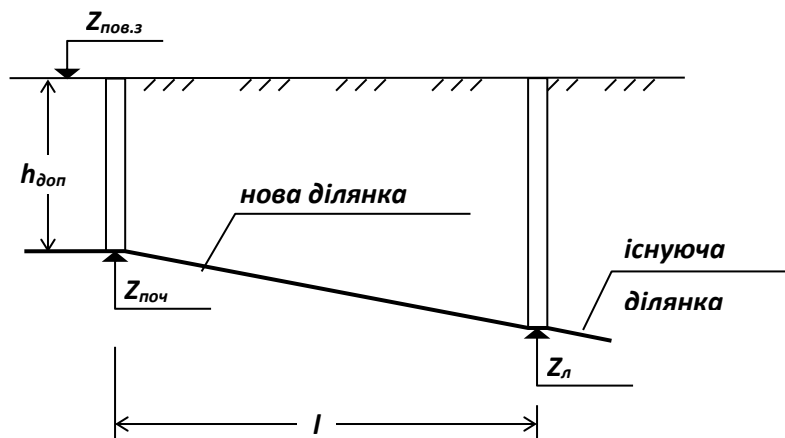


Рисунок 6.3 - Схема підключення нової ділянки до існуючої мережі

$$\begin{aligned} Z_{пов.з} - (Z_{л} + il) &\leq h_{доп} , \\ (Z_{пов.з} - Z_{л} - h_{доп})/l &\leq i_{доп} , \\ (Z_{пов.з} - Z_{л} - h_{доп})/i &\leq l_{необ} , \end{aligned}$$

де $h_{доп}$ - допустиме початкове заглиблення мережі;
 $i_{доп}$ - допустимий мінімальний ухил ділянки;
 $l_{необ}$ - необхідна довжина ділянки.

Рішення, які приймаються в результаті перевірки диктуються умовами прокладки (наприклад, утеплення початкової ділянки, збільшення діаметру із зниженням ухилу і т.п.).

Другий тип задачі зводиться до перевірки виконання тих обмежень, які пред'являються до мереж водовідведення, а саме:

$$v_{факт} \geq v_{доп} , \quad h/D \leq (h/D)_{доп} ,$$

де $v_{факт}$ і $v_{доп}$ - фактична і допустима швидкість в трубопроводі;
 h - глибина води в трубопроводі.

Витрата в самотливому трубопроводі визначається залежністю

$$Q = w v = w c \sqrt{Ri} = w c \sqrt{\frac{w}{\chi} i} .$$

В вирази для Q і v входять значення $w=f(h/D)$ і $\chi=f(h/D)$, в яких h в свою чергу являється функцією Q та i . Тому задача може розв'язуватись числовими методами або на основі нерівностей

$$Q_{\text{факт}} \leq Q_{\text{прон}} ,$$
$$v_{\text{факт}} \geq v_{\text{доп}} ,$$

де $Q_{\text{факт}}$ і $Q_{\text{прон}}$ - фактична витрата і витрата в трубопроводі при заданих D і h/D та відповідно;

$v_{\text{факт}}$ і $v_{\text{доп}}$ - фактична і допустима швидкості відповідно;

w - площа живого перерізу потоку;

χ - змочений периметр;

c - коефіцієнт Шезі.

Аналогічні розрахунки проводяться і при самопливних лотках.

Ємності-регулятори в системах водовідведення використовуються двох видів:

- приймальні резервуари насосних станцій;
- ставки-регулятори в системах дощової каналізації.

При розрахунку ємності приймальних резервуарів каналізаційних насосних станцій враховується, що вона повинна бути не меншою п'ятихвилинної максимальної подачі одного насосу і повинна забезпечувати не більше п'ятиразового автоматичного включення насосів. Якщо резервуар виконано із збереженням цих умов, і насоси не замінюються, то збільшення притоку не порушує першої умови. При цьому друга умова також буде зберігатися до тих пір, поки виконується умова

$$Q_{\text{пр}} \leq Q_{\text{макс}} ,$$

де $Q_{\text{пр}}$ - максимальний приток стічних вод;

$Q_{\text{макс}}$ - максимальна подача одного насосу.

При невиконанні цієї умови перевіряється кількість включень насосу з максимальною подачею за формулою

$$n = Q_{\text{пр}} / (4W) ,$$

де W - об'єм резервуару.

Якщо $n > 5$, необхідно прийняти міри по його зниженню (наприклад, додатково з головним насосом включати насос меншої продуктивності).

Ставки регулятори в системах дощової каналізації дозволяють знизити витрати води в елементах, які слідують за ними.

Питання для самоконтролю

1. Які елементи системи водовідведення складають єдиний гідравлічний комплекс?

2. Яка головна мета виконання перевірочних розрахунків систем водовідведення?
3. Які елементи системи водовідведення є напірними?
4. В яких режимах працюють пневматичні установки систем водовідведення?

Тема 7. Алгоритмізація режимів функціонування інженерних систем транспортування води

1. Головні принципи алгоритмізації визначення робочих параметрів елементів гідравлічних комплексів
2. Особливості алгоритмізації розрахунків добових витрат води та їх застосування для оперативного управління
3. Особливості алгоритмізації розрахунків режимів добового водоспоживання та їх застосування для оперативного управління поточним розподілом.

1. Алгоритм - це точне описання якогось обчислювального процесу або будь-якої іншої послідовності дій. Визначення головних характеристик гідравлічних комплексів базується на використанні відповідних питомих норм таких, як втрати напору на одиницю довжини трубопроводу, витрати води на одного мешканця в одиницю часу і т.п. Крім того, загальні характеристики для комплексу визначаються частіше всього як результат складання відповідних показників для окремих районів. Тому алгоритми визначення головних характеристик гідравлічних комплексів базуються на загальних принципах, які зводяться до того, що вони визначаються спочатку для окремих районів, а потім в циклічному процесі знаходяться для системи в цілому.

В водопровідних мережах для визначення дійсних витрат води і втрат напору в лініях використовуються методи наближення, які також базуються на циклічних процесах. Циклічним процесом описуються і оптимізаційні розрахунки об'ємів регулюючих ємностей.

Розрахунки, які приходить виконувати при аналізах особливостей роботи гідравлічних комплексів, вимагають багаторазового повторення однотипних операцій, тобто, за своєю суттю вони також являються циклічними процесами.

Таким чином, більшість розрахунків, які треба виконувати при аналізах гідравлічних комплексів, базуються на циклічних алгоритмах тієї чи іншої складності.

2. Алгоритми розрахунку добових витрат води на різні потреби

Для систем водопостачання міста необхідно знати добові витрати води на наступні потреби:

- господарсько-питні потреби населення;
- поливка вулиць і зелених насаджень;
- господарсько-питні потреби робочих на виробництві;
- прийом душу на виробництві;
- виробничі потреби;
- пожежогасіння.

Добові витрати на кожний з цих видів потреб можна визначити за формулою:

$$\overline{Q}_i = q_i \times N_i ,$$

де q_i - питома витрата води на i -ті потреби;

N_i - кількість відповідних одиниць, для яких встановлені питомі витрати води (для господарсько-питних потреб населення і робочих на виробництві це буде кількість населення чи робочих; для витрат на поливку - це кількість населення чи відповідна площа, яка поливається; для витрат на душ - це розрахункова кількість душевих сіток; для витрат на виробничі витрати - це добова продуктивність підприємства в одиницях продукції, яка випускається, або в їх вартості; для витрат на пожежогасіння - це розрахункова кількість пожеж).

Таким чином, в принципі алгоритми для визначення середньодобових витрат будуть подібними, але при їх складанні для спрощення розрахунків необхідно враховувати також необхідність знання цих витрат для окремих районів міста, а також витрати в добу з мінімальним та максимальним водоспоживанням. Для промислових підприємств необхідно також знати витрати в кожну зміну. З врахуванням цих особливостей і розроблені алгоритми для визначення відповідних витрат.

На рис.7.1 приведено алгоритм для визначення добових витрат на господарсько-питні потреби населення міста.

В цьому алгоритмі визначення витрат в максимальному і мінімальну добу передбачено за формулами

$$Q_{i \text{ макс}} = \frac{\overline{Q}_{id}}{Q_{id}} \times K_{id \text{ макс}} ,$$

$$Q_{i \text{ мін}} = \frac{\overline{Q}_{id}}{Q_{id}} \times K_{id \text{ мін}} ,$$

а відповідні витрати для міста в цілому визначаються за формулами

$$\overline{Q}_{1m} = \frac{\sum_{1}^{NR} \overline{Q}_{id}}{\sum_{1}^{NR} Q_{id.макс}} ,$$

$$Q_{1d \text{ макс}} = \frac{1}{\sum_{1}^{NR} Q_{id.мін}} ,$$

$$Q_{1d \text{ мін}} = 1 .$$

Як видно з алгоритму, розрахунок для кожного району міста ведеться послідовно:

- спочатку визначаються середня, максимальна і мінімальна добові витрати для першого району;
- потім вони визначаються для другого району і в відповідних чарунках пам'яті машини нагромаджуються шляхом складання з відповідними величинами першого району;
- цикл повторюється до перебору всіх районів міста;
- друкуються величини середніх, максимальних і мінімальних витрат для кожного району і міста в цілому.

Алгоритм реалізовано в програмі під назвою **Rashoz.for**.

На рис.7.2 приведено алгоритм розрахунку витрат води на поливання вулиць і зелених насаджень, виходячи з питомої витрати на одного мешканця. При цьому витрати на поливку силами дворників і машинами визначаються роздільно в кожному районі за формулами

$$\begin{aligned} Q'_{id\partial\partial} &= 0,4 q_i N_i / 1000 , \\ Q''_{id\partial\partial} &= 0,6 q_i N_i / 1000 . \end{aligned}$$

Після чого знаходиться загальна витрата на полив в районі

$$Q_{id} = Q'_{id\partial\partial} + Q''_{id\partial\partial} .$$

Загальні витрати в окремих районах і по місту в цілому визначаються нагромадженням в відповідних чарунках пом'яті машини обчислених для кожного району величин за формулами

$$Q'_{2\partial} = \sum_1^{NR} Q'_{id} , \quad Q''_{2\partial} = \sum_1^{NR} Q''_{id} , \quad Q_{2\partial} = \sum_1^{NR} Q_{id} .$$

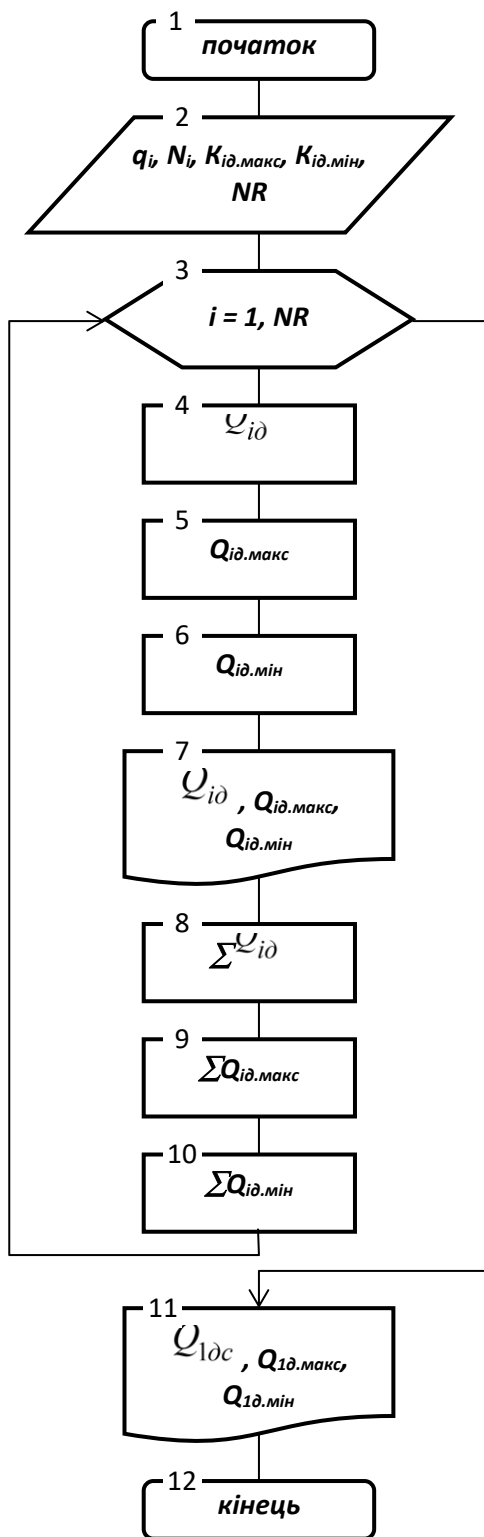


Рисунок 7.1 - Блок-схема розрахунку витрат води на господарсько-питні потреби міста

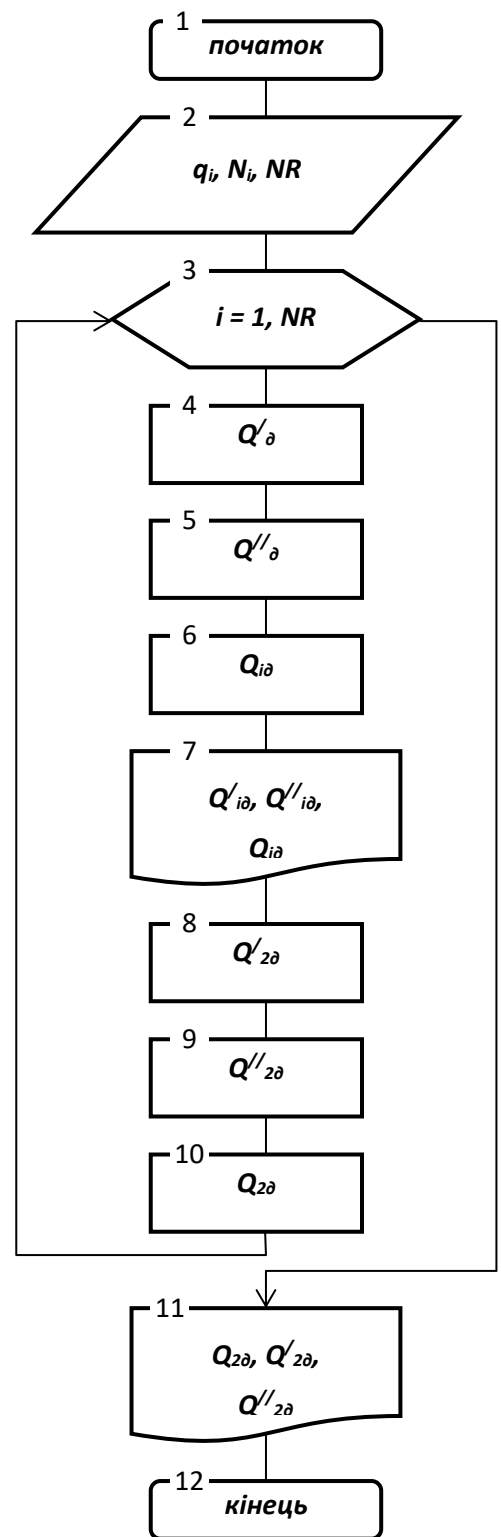


Рисунок 7.2 - Блок-схема розрахунку добових витрат води на поливку по питомій витраті на 1 мешканця

Блок-схема, яка приведена на рис. 29, реалізована в програмі під назвою **Raspol1.for**.

Блок-схема розрахунку добових витрат води на поливку вулиць і зелених насаджень на основі питомих витрат по площам, які поливаються, приведена на

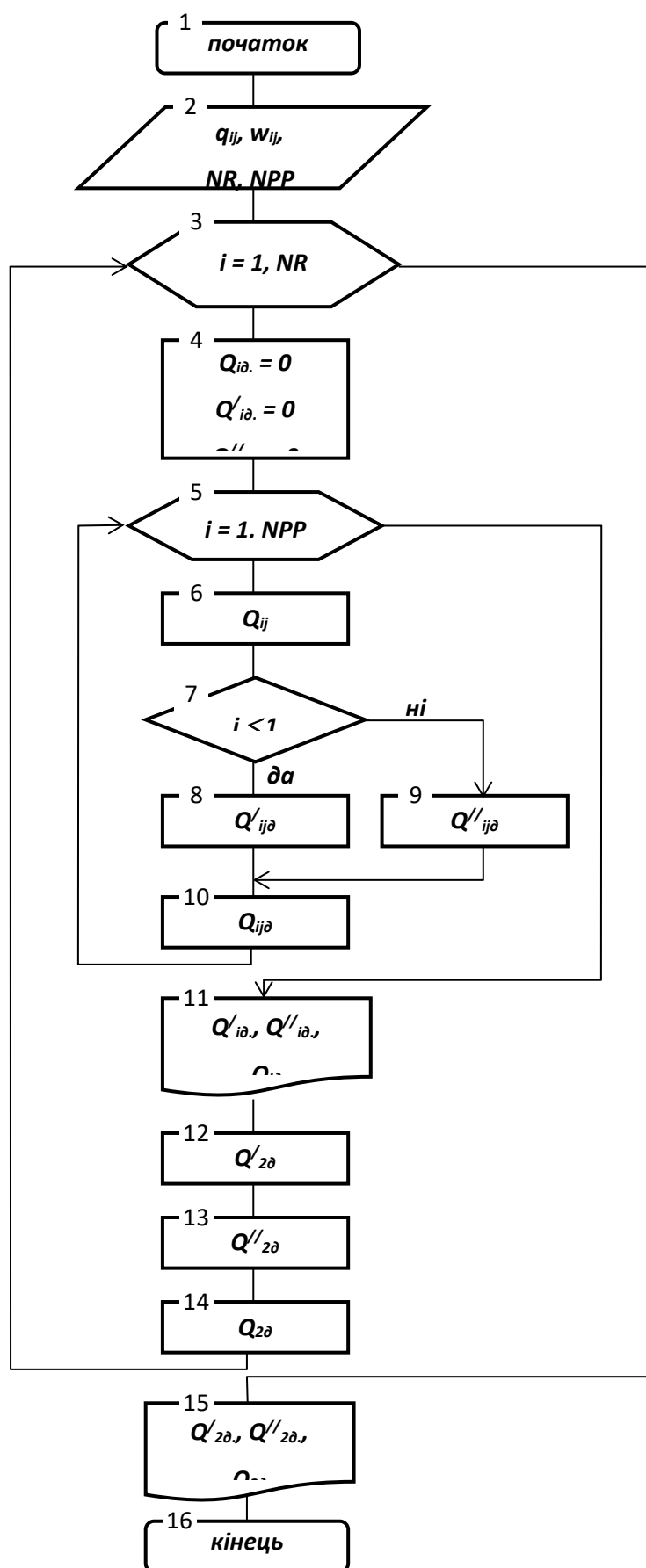


Рисунок 7.3 - Блок-схема розрахунку добових витрат води на поливку по питомій витраті на 1 м²

рис.7.3.Згідно з цим алгоритмом обчислюються і виводяться до друку такі ж величини, як і в попередньому випадку. Особливістю алгоритму являється те, що процес обчислення в ньому організується за схемою алгоритмів із структурою вкладених циклів. Блок-схема включає внутрішній цикл з параметром який змінюється по кількості площ, які поливаються, від 1 до NPP. Цей цикл забезпечує обчислення добових витрат окремих районів міста з фіксацією витрат води силами двірників і машинами. При цьому використовуються формули:

$$Q_{ij} = m_{ij} q_{ij} w_{ij},$$

$$Q'_{ijд} = \sum_{j=1}^2 Q_{ij} \quad \text{для } j \leq 2$$

(відповідає поливу машинами),

$$Q''_{ijд} = \sum_{j=3}^{NPP} Q_{ij} \quad \text{для } j > 2$$

(відповідає поливці вручну).

$$Q_{ijд} = Q'_{ijд} + Q''_{ijд},$$

де m_{ij} - кількість поливок;
 q_{ij} - питома витрата води на 1 м²;

w_{ij} - j -а площа, що поливається, в i -му районі;

$Q'_{ijд}$ - добова витрат води на поливку механізованим способом;

$Q''_{ijд}$ - те ж силами двірників;

$Q_{ijд}$ - добова витрата води на поливку в i -му районі.

Для того, щоб розділити механізовану і ручну поливки, при вводі вихідних даних необхідно спочатку вводити механізовану поливку, а потім ручну.

Втрати $Q'_{ij\partial}$, $Q''_{ij\partial}$, $Q_{ij\partial}$ записуються машиною в окремі чарунки, в яких проводиться нагромадження витрат всіх районів для одержання добових витрат на поливку машинами і силами дворників для міста в цілому, використовуючи залежності

$$Q'_{2\partial} = \sum_1^{NR} Q'_{ij\partial},$$

$$Q''_{2\partial} = \sum_1^{NR} Q''_{ij\partial},$$

$$Q_{2\partial} = Q'_{2\partial} + Q''_{2\partial},$$

де $Q'_{2\partial}$ - витрата на поливку в місті машинами;

$Q''_{2\partial}$ - те ж саме дворників;

$Q_{2\partial}$ - те ж для міста в цілому.

Алгоритм реалізовано в програмі **Raspol2.for**.

Блок-схема розрахунку добових витрат води на господарсько-питні потреби робочих на промислових підприємствах приведена на рис. 31. Алгоритм дозволяє визначити і надрукувати добові витрати води в гарячих та холодних цехах окремо в кожній зміні, загальні зміни витрати кожного промислового підприємства, сумарні витрати води в гарячих і холодних цехах всіх підприємств і по місту в цілому.

Блок-схема включає 2 цикли: *внутрішній* і *зовнішній*. Внутрішній цикл забезпечує визначення витрат по змінам на кожному підприємстві і по видам цехів. Цей цикл керується параметром , який відповідає кількості змін на підприємствах. При цьому використовуються формули

$$Q_{zjzm} = 0,045 N_{zjj},$$

$$Q_{xjzm} = 0,025 N_{xjj},$$

$$Q_{jzm} = Q_{zjzm} + Q_{xjzm},$$

$$Q_{i\partial} = \sum_1^{NZ} Q_{jz\partial},$$

$$Q_{2\partial} = \sum_1^{NZ} Q_{zjzm},$$

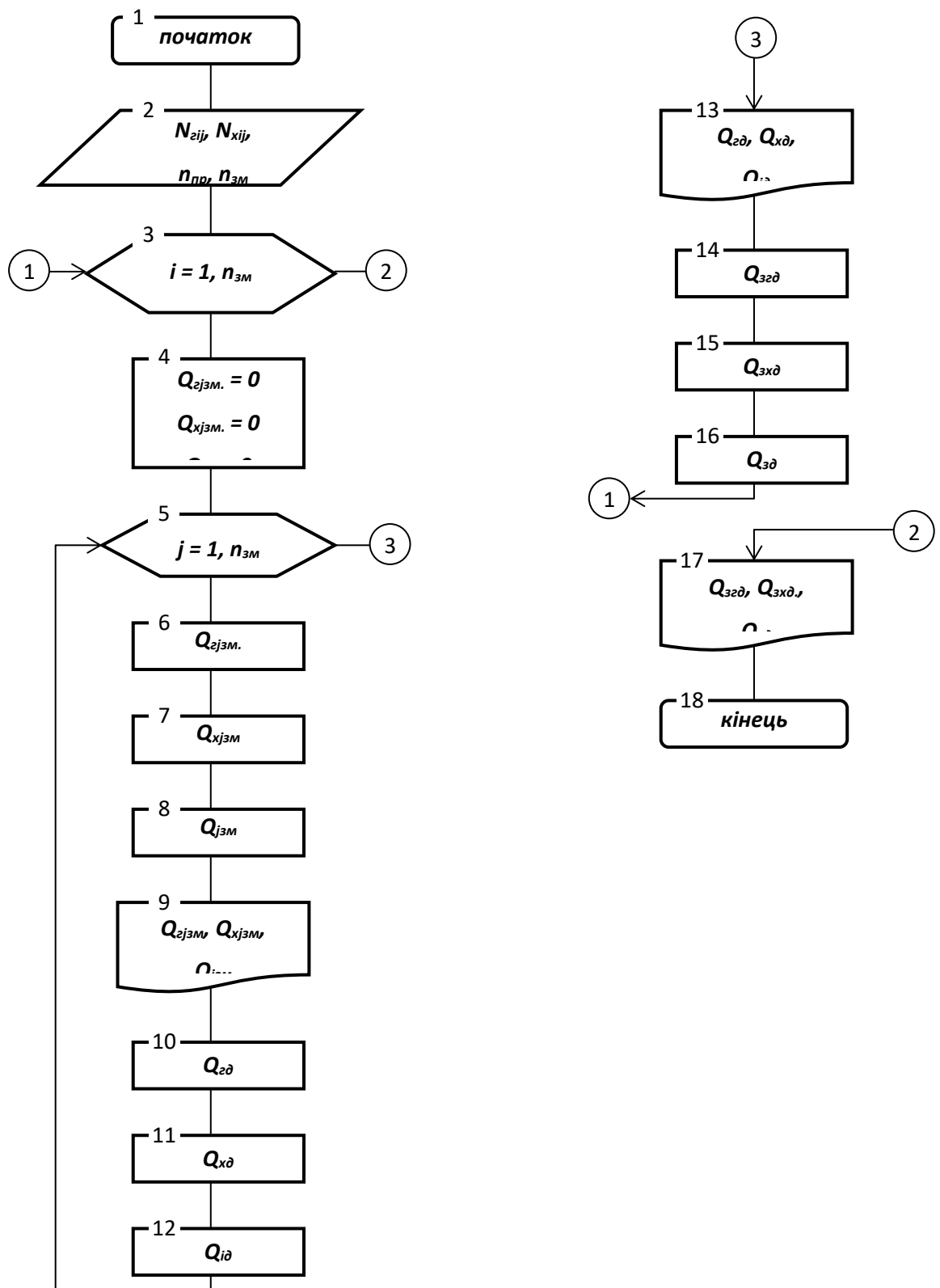


Рисунок 7.4 - Блок-схема розрахунку витрат на господарсько-питні потреби робочих промислових підприємств

$$Q_{x\partial} = \sum_1^{NZ} Q_{xjzm},$$

де Q_{gjzm} і Q_{xjzm} - витрата в гарячому і холодному цехові підприємства, яке розглядається;
 Q_{jzm} - загальна витрата в j -й зміні підприємства, яке розглядається;
 $Q_{j\partial}$ - добова витрата для j -го підприємства;
 $Q_{z\partial}$ і $Q_{x\partial}$ - добові витрати в гарячих і холодних цехах підприємства відповідно;
 NZ - кількість змін роботи.

В зовнішньому циклі передбачається визначення добових витрат по місту в цілому і по видам цехів. Цей цикл керується параметром, який відповідає кількості підприємств в місті. Сумарні витрати визначаються за формулами

$$Q_{z\partial} = \sum_1^{n_{np}} \sum_1^{n_{zm}} Q_{gjzm},$$

$$Q_{x\partial} = \sum_1^{n_{np}} \sum_1^{n_{zm}} Q_{xjzm},$$

$$Q_{z\partial} = Q_{z\partial} + Q_{x\partial},$$

де $Q_{z\partial}$, $Q_{x\partial}$, $Q_{z\partial}$ - витрата в гарячих, холодних цехах і всього по місту в цілому відповідно.

Алгоритм реалізовано в програмі **Hozprom.for**.

3. Розрахунок добового режиму водоспоживання ведеться у формі таблиці сумарного водоспоживання. Але при його розрахунку на ЕОМ складати таку таблицю немає необхідності тому, що в подальшому не вся інформація, яка в ній є, використовується. Тому буде достатньо, якщо на основі розрахунку ЕОМ буде видаватися тільки інформація, яка необхідна для подальшого розрахунку мереж. Алгоритм розрахунку повинен забезпечувати одержання такої інформації:

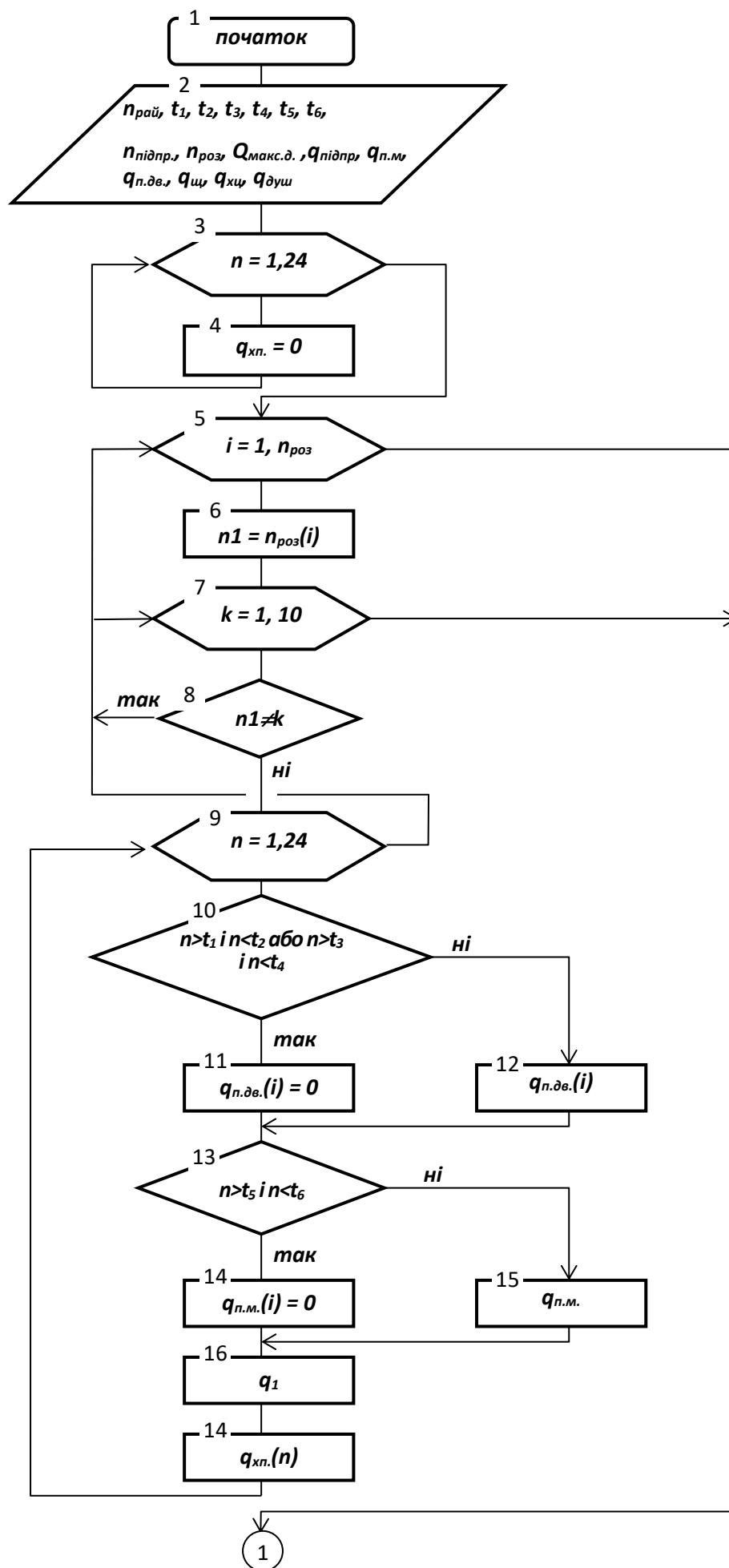
- сумарна добова витрата міста;
- погодинні витрати води міста в m^3 і %;
- середні, мінімальні, максимальні годинні і секундні витрати води містом;
- номери годин з мінімальним та максимальним водоспоживанням;
- розрахункові рівномірно розподілені витрати для годин максимального і мінімального водоспоживання для різних районів міста;
- зосереджені витрати промислових підприємств міста в години максимального та мінімального водоспоживання.

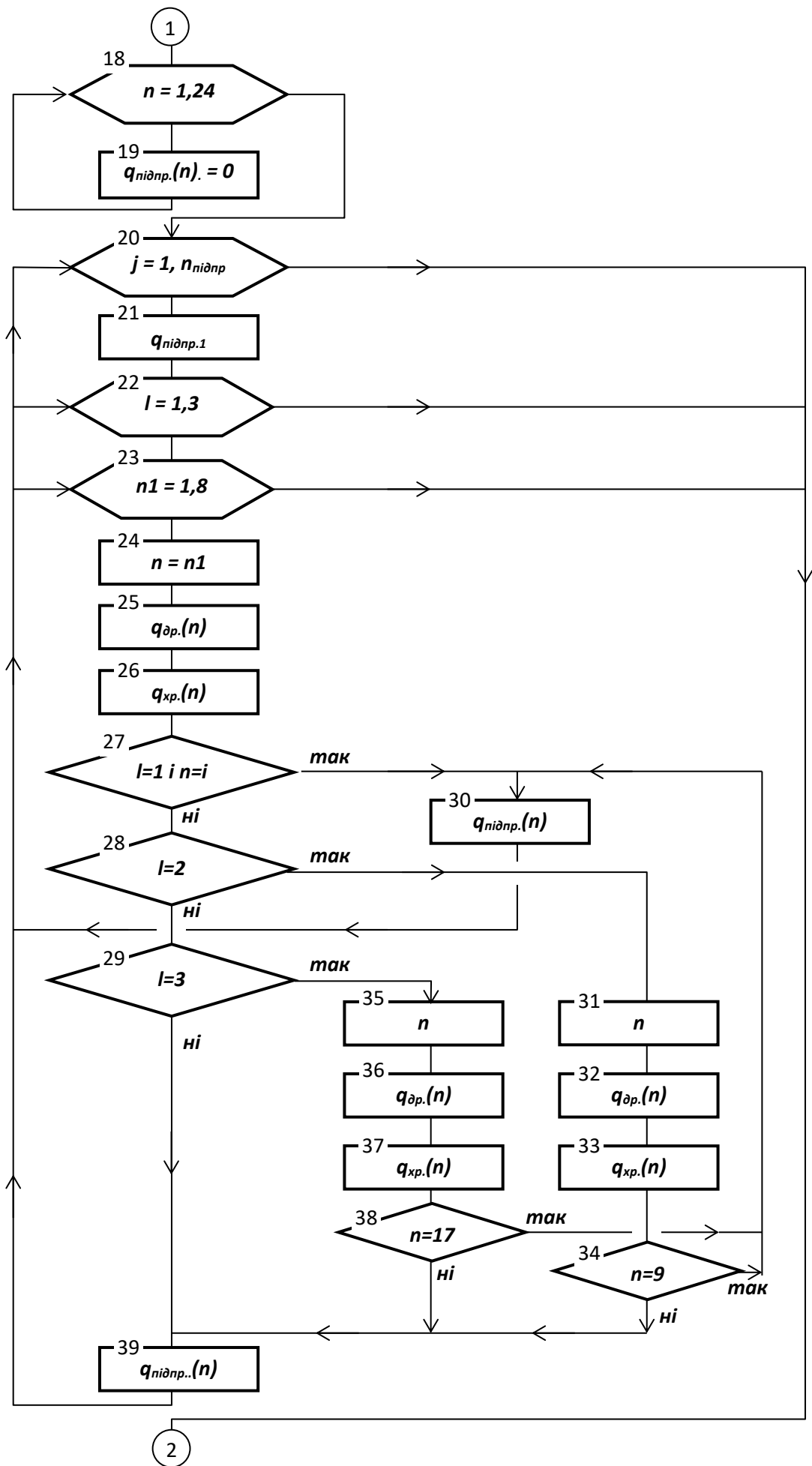
Алгоритм розрахунку режиму водоспоживання міста приведено на рис. 32.

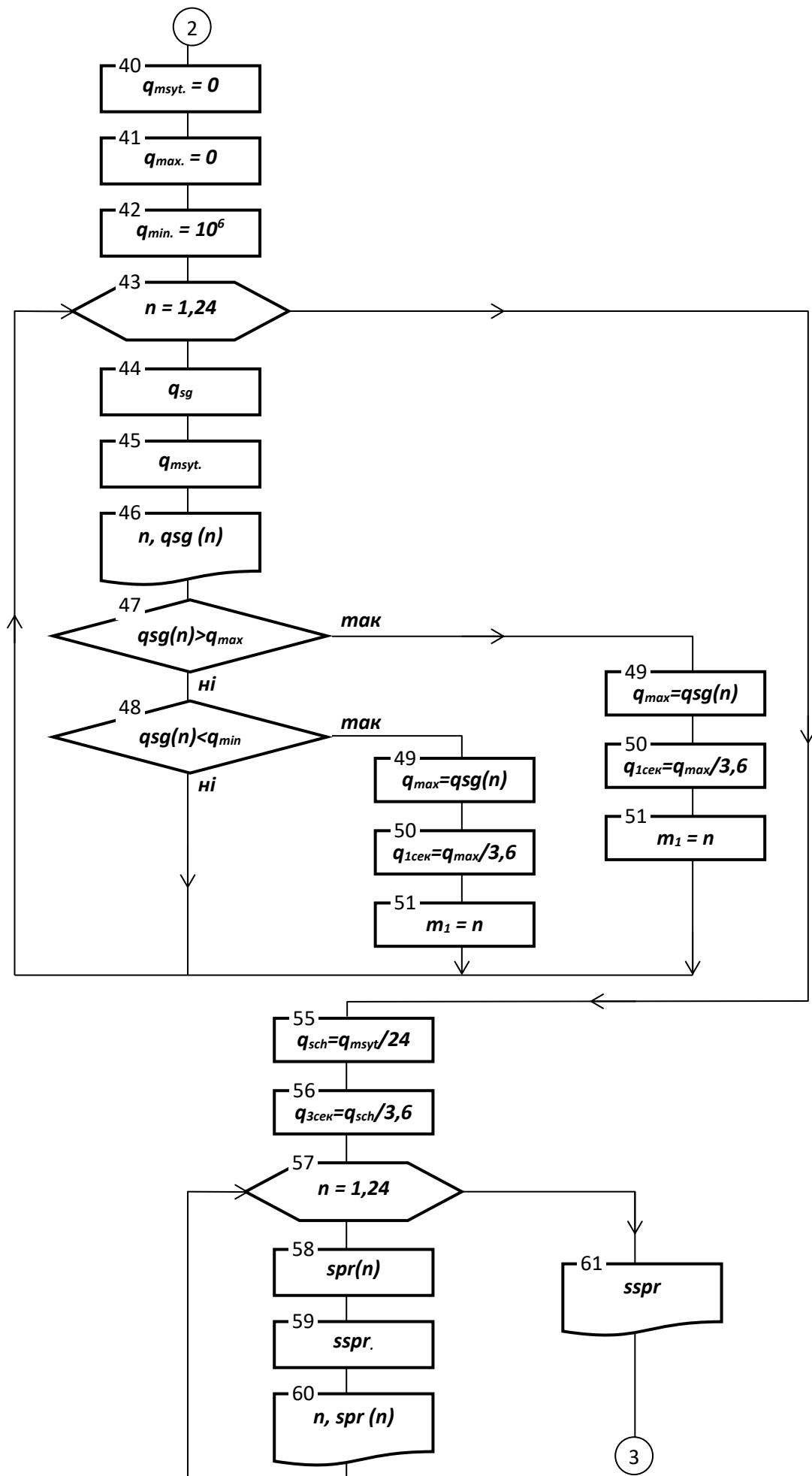
Визначення погодинних витрат води в місті в m^3 організовано в блоках **3-46**. При цьому максимальна добова витрата на господарсько-питні потреби міста розподіляється по годинах доби відповідно до міста - аналогу, яке задається в вихідних даних номером розподілу відповідно до коефіцієнту годинної нерівномірності. Годинні витрати

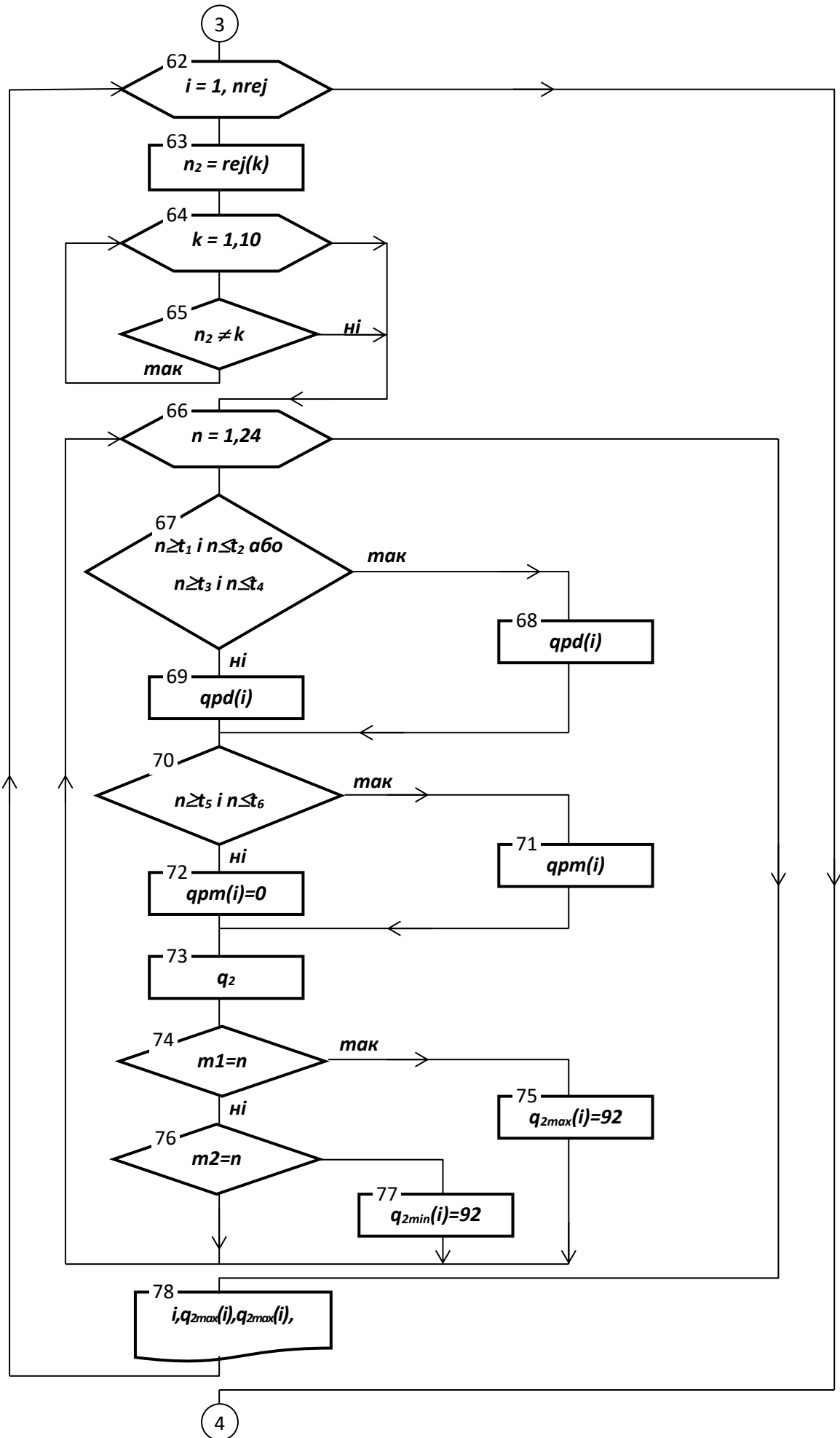
промислових підприємств визначаються на основі витрат в холодних і гарячих цехах в змiну шляхом їх відповідного розподілу за відсотками, які записані в програмі. Витрати на душ задаються в вихідних даних. Витрати на виробничі потреби приймаються як середні за 24 години.

В блоках **41-56** визначаються витрати в максимальну, середню і мінімальну години, а також номери максимальної і мінімальної години. Для проектування режиму роботи насосної станції II підйому алгоритмом передбачається в блоках **57-61** визначення погодинного розподілу добової витрати в відсотках як співвідношення годинних витрат до максимальної добової.









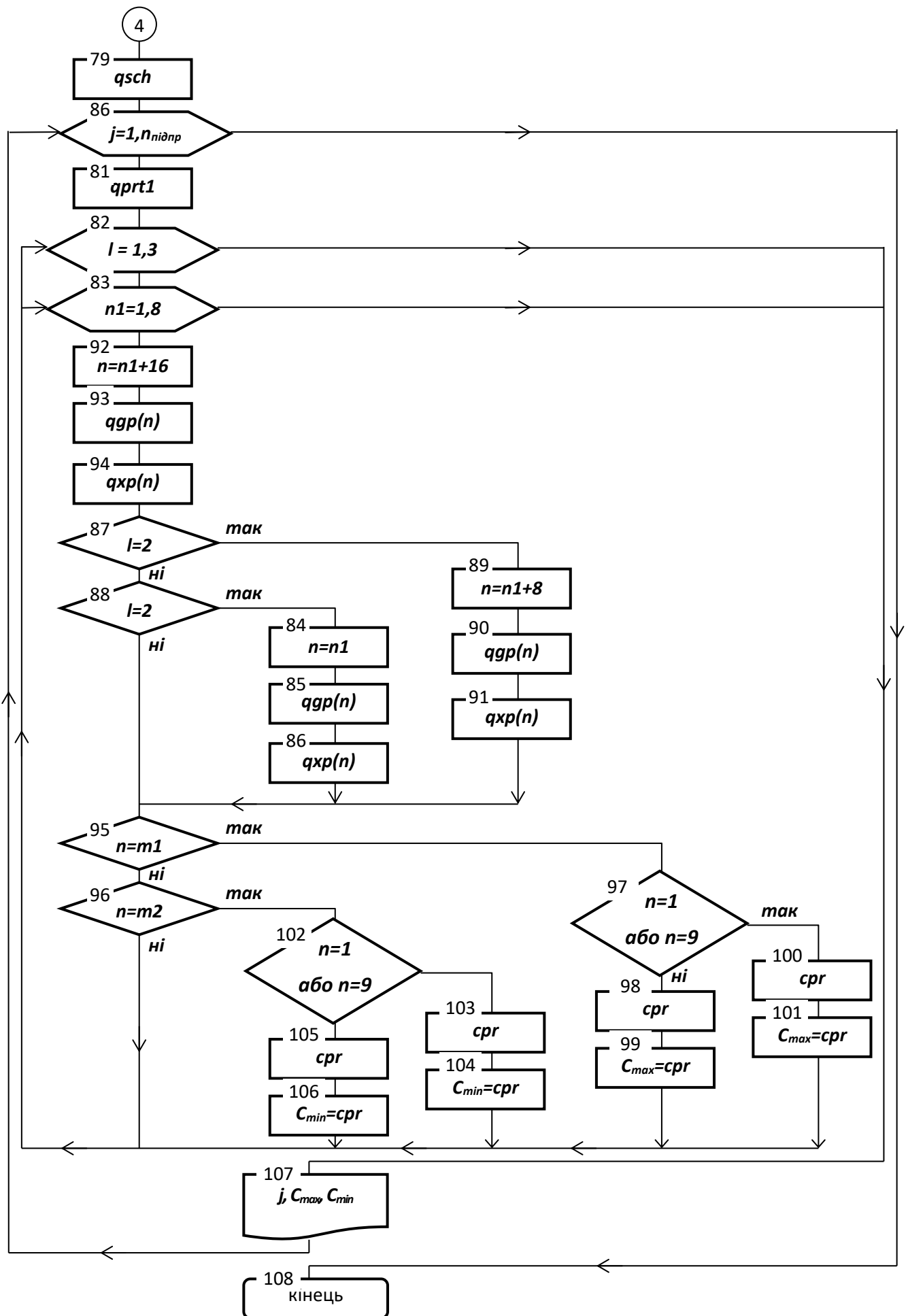


Рисунок 7.5 - Блок-схема розрахунку режиму добового водоспоживання міста

В блоках **62-77** організовано визначення максимальних і мінімальних витрат, які рівномірно розбираються з мережі в кожному з районів міста. В них спочатку знаходиться необхідний розподіл за годинами максимальної добової витрати, на основі якого визначаються витрати на господарсько-питні потреби міста. Потім визначаються годинні витрати на поливку двірниками і машинами, для чого спочатку перевіряється, чи потрапляє година, що розглядається, в періоди поливки тим чи іншим способом. А в кінці цієї групи блоків знаходяться сумарні максимальні та мінімальні витрати кожного з районів.

Сумарна добова витрата міста видається на друк для контролю.

В блоках **80-106** аналізується режим погодинних витрат на різні потреби в холодних і гарячих цехах промислових підприємств і визначаються максимальні та мінімальні годинні витрати кожного з підприємств.

Обмеженість розглянутого алгоритму зводиться до того, що при визначенні погодинної витрати на виробничі потреби прийнято, що вони працюють цілодобово. Враховуючи, що підприємства можуть також працювати лише в одну або дві зміни в вихідні дані доцільно ввести кількість змін для кожного з підприємств у вигляді масиву. В змалюванні цієї змінної її необхідно записати в “цілих”. В блоці **21** необхідно організувати блок, який повинен спочатку визначити, скільки змін роботи в підприємстві, що розглядається, а потім визначити витрату води на виробничі потреби за формулою

$$qp_{rt1} = qp_{rt}(j) / t_{nidnp.} ,$$

де $t_{nidnp.}$ - термін добової роботи підприємства (8, 16 чи 24 години).

Розглянутий алгоритм реалізовано в програмі **Rejsyt.for**.

Питання для самоконтролю

- 1.Що таке алгоритм розрахунку мережі?
- 2.Які методи застосовують для визначення дійсних витрат води і втрат напору у водопровідних мережах?
- 3.Як визначаються витрати на господарсько-питні потреби підприємства?
- 4.Які основні етапи розрахунку системи в режимі добового водоспоживання?

Тема 8. Алгоритмізація розрахунків елементів водопровідних систем

1. Особливості алгоритмізації розрахунку регулюючої ємності водонапірних веж.
2. Особливості алгоритмізації гідравлічних розрахунків кільцевої інженерних мереж.
3. Особливості алгоритмізації визначення максимальної пропускної можливості ділянки мережі транспортування речовин, що очищуються.
4. Особливості алгоритмізації розрахунків гідравлічних комплексів систем інженерних мереж.
5. Перерозподіл потоків як один із методів зворотного зв'язку при оперативному керуванні.

1. Розрахунок об'ємів регулюючих ємностей вимагає відносно великих витрат часу (особливо при оптимізаційних розрахунках). При цьому можливі два типи задач:

- визначення регулюючої ємності баку при відомому режимі подачі насосної станції II підйому;
- визначення регулюючої ємності баку при режимові подачі, який необхідно розрахувати.

В першому випадку розрахунок зводиться до визначення залишків в баці при відомих погодинних подачах насосної станції і знаходження серед них найбільшого додатного та від'ємного, сума яких за абсолютною величиною дає величину регулюючої ємності в відсотках.

Блок-схема розв'язування другого типу задачі залежить від виду режиму подачі насосної станції. На рис. 8.1 і 8.2 приведені блок-схеми розрахунку об'ємів регулюючих ємностей і режиму подачі насосної станції II підйому при двохступеневій (рис. 8.1) і та частина при трьохступеневій подачі, яка відрізняє цю блок-схему від попередньої (рис. 8.2). Для спрощення програм схеми подач в реальному часі змінюються, як показано на рис. 8.3 і 8.4. З цих графіків видно, що при розрахунку на ПЕОМ за вихідну годину приймається:

- при двохступеневій подачі - перша година більшого ступеню;
- при трьохступеневій подачі - перша година середнього ступеню.

Обидва алгоритми будуються за близькими схемами і відрізняються тільки блоком визначення подачі насосів на кожному ступеню.

Основою блок-схем, які розглядаються, являються два цикли, один з яких забезпечує розрахунок режиму подачі, контроль зміни регулюючої ємності при зміні режиму подачі і знаходження мінімальної регулюючої ємності, а другий - забезпечує друкування результатів розрахунку у вигляді таблиці.

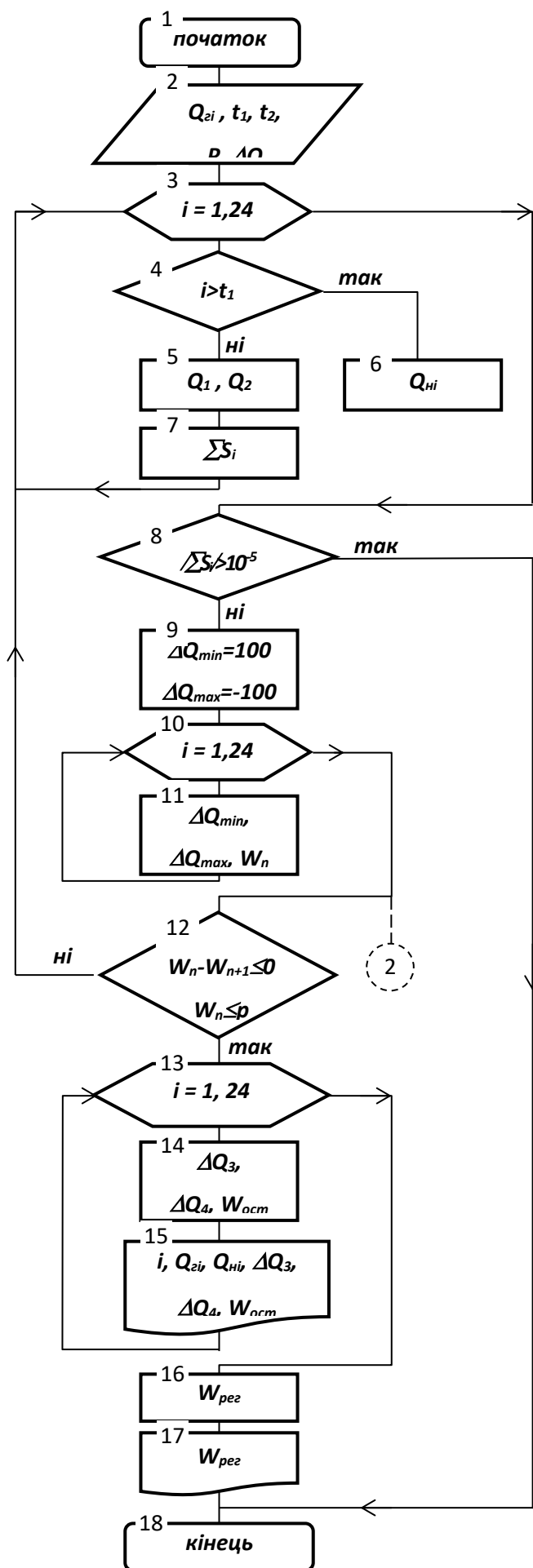


Рисунок 8.1 -Блок-схема розрахунку ємності регулюючого баку при двохступеневій подачі насосної станції

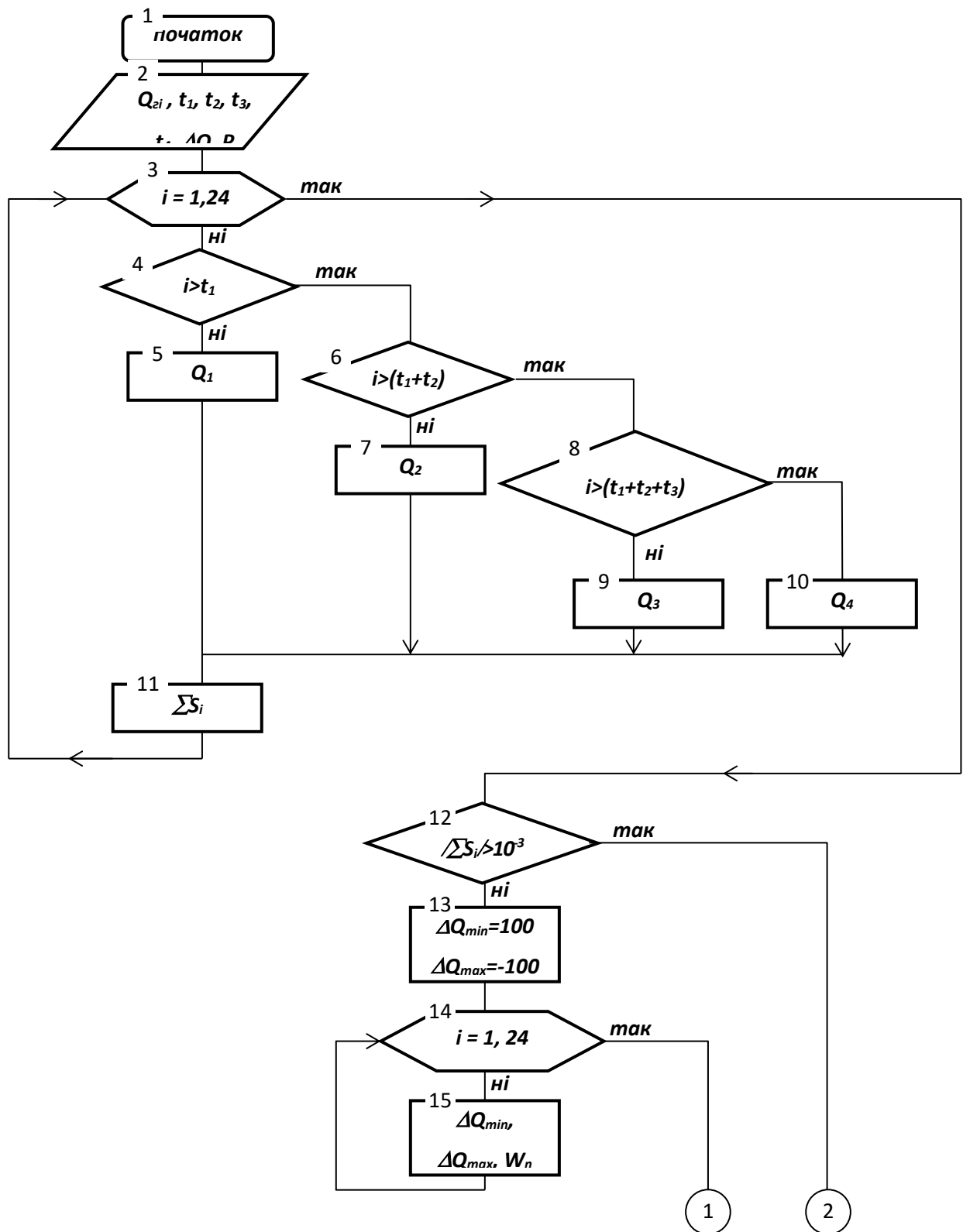
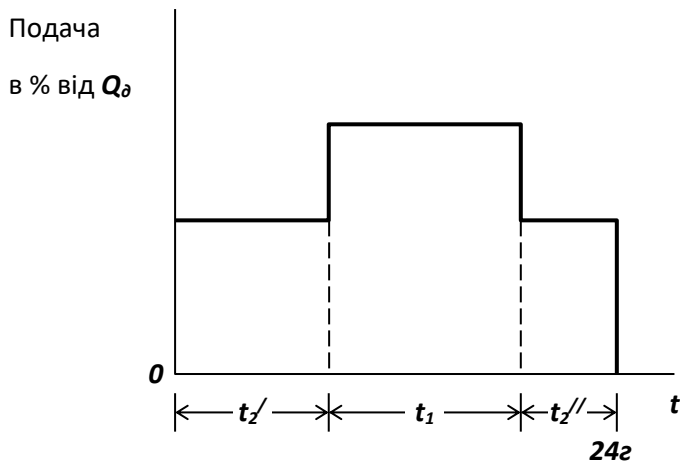
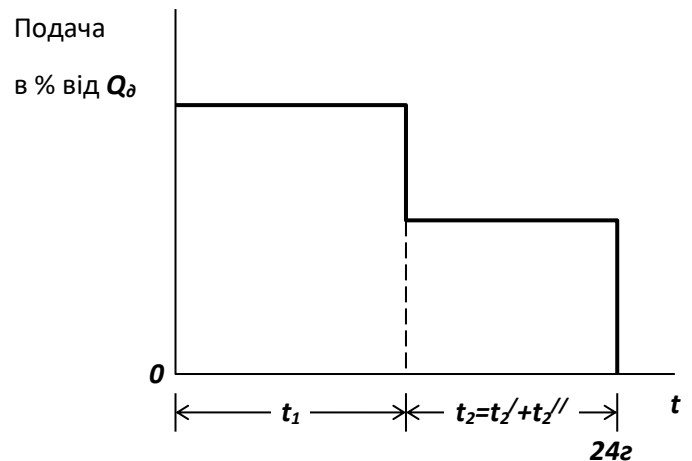


Рисунок 8.2 - Блок-схема розрахунку ємності регулюючого баку при трьохступеневій подачі (1 і 2 - вузли з'єднання з другою частиною блок-схеми на рис.8.1)

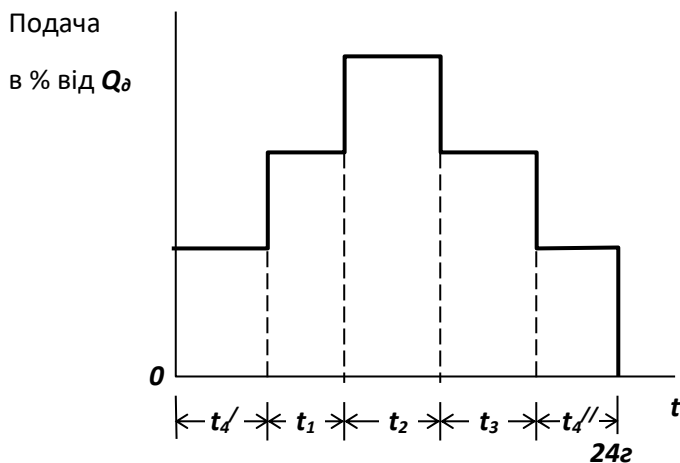


Реальна схема подачі води

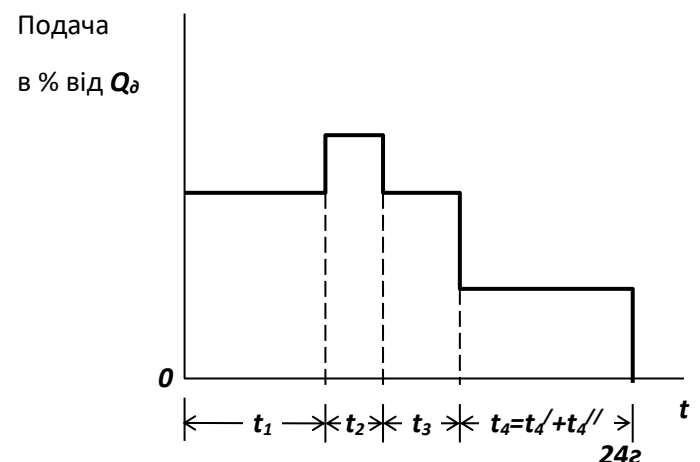


Розрахункова схема подачі при вводі в ПЕОМ

Рисунок 8.3 - Добові графіки при двохступеневій подачі



Реальна схема подачі води



Розрахункова схема подачі при вводі в ПЕОМ

Рисунок 8.4 - Добові графіки при трьохступеневій подачі

Перший цикл в блок-схемах являє собою зовнішній цикл, який керується блоком співставлення 12 в залежності від зміни об'єму регулюючої ємності. Зовнішній цикл охоплює два внутрішні цикли, один з яких забезпечує розрахунок режиму подачі насосу (блоки 3-7 - при двохступеневій подачі або блоки 3-11 при трьохступеневій), а другий - розрахунок об'єму регулюючої ємності на кожному кроці ітерації (блоки 9-11 або 13-15).

Розрахунок режиму подачі насосів починається з рівномірної подачі. Після цього змінюється величина подачі на крок ітерацій ΔQ , який дається в вихідних даних. Величина ΔQ додається до всіх ступенів подачі, які перевищують середню подачу за добу. При трьохступеневій подачі крок другого ступеню (t_1 і t_2) змінюється на кожній ітерації на величину $\Delta Q/2$. Зміна подачі кожного ступеню припиняється при досягненні об'єму регулюючої ємності P в відсотках від Q_d , який задається в вихідних даних, або при досягненні мінімальної величини цієї ємності. Оптимізація регулюючої ємності, яка

розраховується, досягається шляхом зміни тривалості подачі на кожному ступені для наближення графіку подач насосів до графіка водоспоживання.

Друкування результатів для кожної години передбачається в середині другого циклу, а загального об'єму регулюючої ємності за межами циклів.

Обчислення виконуються за наступними формулами:

- годинна подача насосної станції при двохступеневій подачі і для годин на протязі терміну t_1 ($i \leq t_1$)

-

$$Q_{н.з.i} = 100/24 + \Delta Q ;$$

- годинна подача насосної станції при трьохступеневій подачі на протязі терміну t_1

-

$$Q_{н.з.i} = 100/24 + \Delta Q/2 ;$$

- загальна подача насосної станції за термін t_1

-

$$Q_1 = Q_{н.з.i} t_1 ;$$

- загальна подача насосної станції на другому ступені

-

$$Q_2 = 100 - Q_1 ;$$

- годинна подача насосної станції на другому ступені

-

$$Q_{н.з.i} = Q_2 / t_2 ;$$

- годинна подача насосної станції за термін t_2 при трьохступеневій подачі

$$Q_{н.з.i} = 100/24 + \Delta Q ;$$

- загальна подача насосної станції за термін t_2 при трьохступеневій подачі

$$Q_2 = Q_{н.з.i} t_2 ;$$

- годинна подача насосної станції при трьохступеневій подачі на протязі терміну t_3

$$Q_{н.з.i} = 100/24 + \Delta Q/2 ;$$

- загальна подача насосної станції при трьохступеневій подачі на протязі терміну t_3

-

$$Q_3 = Q_{н.з.i} t_3 ;$$

- загальна подача останнього ступеню при трьохступеневій подачі насосної станції

$$Q_4 = 100 - Q_1 - Q_2 - Q_3 ;$$

- годинна подача насосної станції при трьохступеневій роботі

-

$$Q_{н.г.i} = Q_4 / t_4 ;$$

- різниця в подачі води насосами і розбором її з мережі в *i*-у годину

-

$$S_i = Q_{н.г.i} - Q_{м.г.i} ;$$

- розрахункова ємність баку на кожному кроці ітерації

-

$$W_1 = \Delta Q_{\min} / + \Delta Q_{\max} ;$$

- залишок води в баці на кінець кожного *i*-го часу обчислюється за формулою:

$$W_{зал\ i+1} = W_{зал\ i} + \Delta Q_{в\ бак} + \Delta Q_{з\ баку} .$$

Обидва алгоритми реалізовані в програмах **Bakrej2s.for** і **Bakrej3s.for** відповідно. Обидві програми забезпечують знаходження або мінімальних об'ємів регулюючих баків або об'ємів, які задовольняють заданому в вихідних даних допустимому відсотку від добової витрати. В першому випадку в вихідних даних заноситься $P=0$, а в другому - $P= P_{дон}$. Це досягається за рахунок того, що розрахунок починається, виходячи з найбільшого відхилення режимів водоспоживання і подачі насосами. При зближенні їх розрахункова ємність зменшується. Вона буде зменшуватись до певної межі, після переходу через яку знову стане зростати, тобто функція наближення має мінімум.

3. Гідравлічна ув'язка мережі необхідна для визначення дійсного розподілу потоків в водопровідній мережі при вибраних діаметрах труб. Вона може виконуватися за чотирьма алгоритмами, які відрізняються способами обчислення втрат напору на ділянках, способами визначення "нев'язки", наявністю чи відсутністю кілець зовнішньої ув'язки, невідомими, які корегуються, а також врахуванням чи ні результатів контролю тиску.

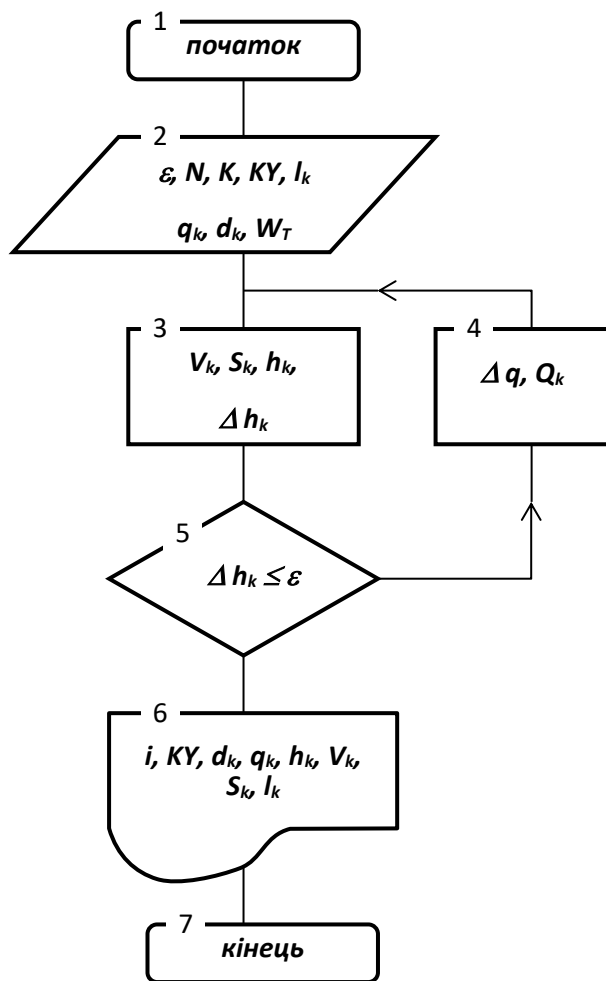


Рисунок 8.5 - Укрупнена блок-схема ув'язки кільцевої водопровідної мережі

Блок-схема, на основі якої розроблена програма **“Gidrast1.for”**, приведена на рис. 37. Вихідними даними для розрахунку являються діаметри ділянок d_k , їх довжина l_k , витрати на ділянках мережі q_k , які одержані після попереднього розподілу потоків, матеріал труб W , код ділянки KY , кількість кілець N , кількість ділянок K , а також точність розрахунку ε . За попередньо наміченими витратами визначаються втрати напору на ділянках h_k , а потім величини нев'язок в кільцях Δh_k . Якщо $\Delta h_k > \varepsilon$ змінюються витрати на ділянках і знову повторюється розрахунок. Цикли повторюються до виконання умови $\Delta h_k \leq \varepsilon$. В програмі **“Gidrast1.for”** втрати напору визначаються за формулою

$$h = S q^2,$$

де S - опір ділянки.

Питомий опір ділянки визначається за емпіричною формулою Шевелева Ф.А., з використанням емпіричних коефіцієнтів α_1 , a і b .

Програма **“Gidrast3.for”**

передбачає ув'язку не тільки в кожному кільці, але і по окремим напрямом, різниця тисків між кінцевими точками яких відома. Укрупнений принциповий алгоритм ув'язки, на основі якого вона розроблена, приведена на рис.38.

Програма **“Gidrast3.for”** дозволяє ув'язувати мережі, які дають рівняння, що погано сходяться. Вона також дає можливість визначити витрати в ділянках з невеликою помилкою, якщо при вимірюванні тисків в контрольних вузлах була допущена неточність. Цією програмою передбачено обчислення втрат напору на ділянках за формулою

$$h_i = k_i q_i^\beta / D_i^\alpha,$$

де k_i - коефіцієнт, який залежить від матеріалу труб [6];

α і β - показники ступеню, які приймаються по БНіП [6] в залежності від типу труб;

D_i - діаметр i -ої ділянки.

Величини k , α і β внесені безпосередньо в програму, і до них машина звертається самостійно при виконанні розрахунків.

Для користування цією програмою до вихідних даних, крім тих даних, що даються в попередніх програмах, необхідно додати:

- початкову нев'язку на напрямі, що контролюється, $e1$;
- кількість напрямів, що контролюються, $kolizm$;
- по кожному з напрямів вказуються:
- різниця напорів на кінцях кожного з напрямів $dhizm (k1)$;
- кількість ділянок на напрямі $kol (k1)$;
- номери ділянок, які входять в напрям, $nuch (k1, k2)$.

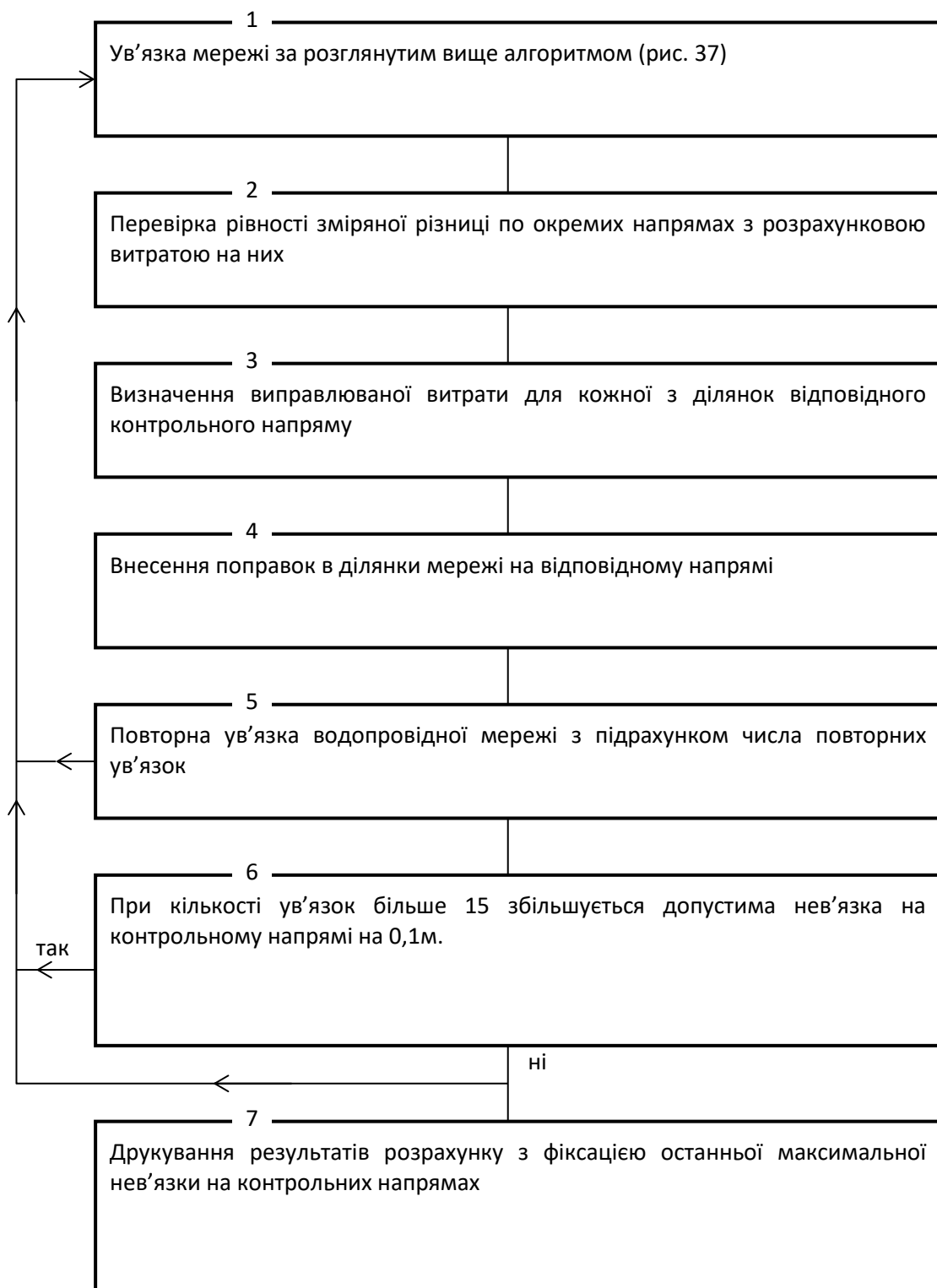


Рисунок 8.6 - Укрупнений принциповий алгоритм ув'язки водопровідної мережі з контролюванням тисків в ряді її вузлів

Програмою “**Gidrast5.for**” передбачена ув’язка водопровідних мереж з використанням фіктивних зовнішніх кілець. Вона необхідна при розрахунках кільцевих мереж, які отримують воду від кількох водоживлювачів таких, як насосні станції і напірні резервуари. Розрахунок виконується в основному так, як передбачено блок-схемою, приведеною на рис. 37, але з обчисленням втрат напору за формулою БНіП [6]. Крім того, в програмі передбачається аналіз чи являється ділянка, яка розглядається, реальною чи вона фіктивна. Це необхідно для того, щоб розрахувати втрати напору в фіктивних лініях, які визначаються за формулою

$$H = H_{\phi} - S_{\phi} Q^2 ,$$

де H_{ϕ} - напір насосу при $Q=0$;

S_{ϕ} - фіктивний опір насосу (для водопровідних башт $S_{\phi}=0$).

В вихідних даних додатково до тих, що вводяться в програмі “**Gidrast5.for**”, даються такі:

- кількість фіктивних ліній $n_{\phi ik}$;
- напір водоживлювача H_{ϕ} або висота водонапірної башти;
- фіктивний опір водоживлювача;
- глибина води в напірному резервуарі (якщо вони є в схемі).

Результати розрахунків даються так, як і інших програмах, а для кожного з водоживлювачів в таблиці дається його розрахункова витрата.

3 Алгоритм визначення максимальної пропускної можливості ділянки водовідведення.

При реконструкції діючих мереж водовідведення приходить оцінювати можливість пропуску окремими ділянками збільшених витрат. При цьому задача зводиться до визначення максимальної витрати трубопроводом, прокладеним з ухилом i , якщо в ньому буде максимальне наповнення, що рекомендується БНіП [7], та швидкості руху рідини в ньому. Блок-схема розрахунку приведена на рис. 8.7.

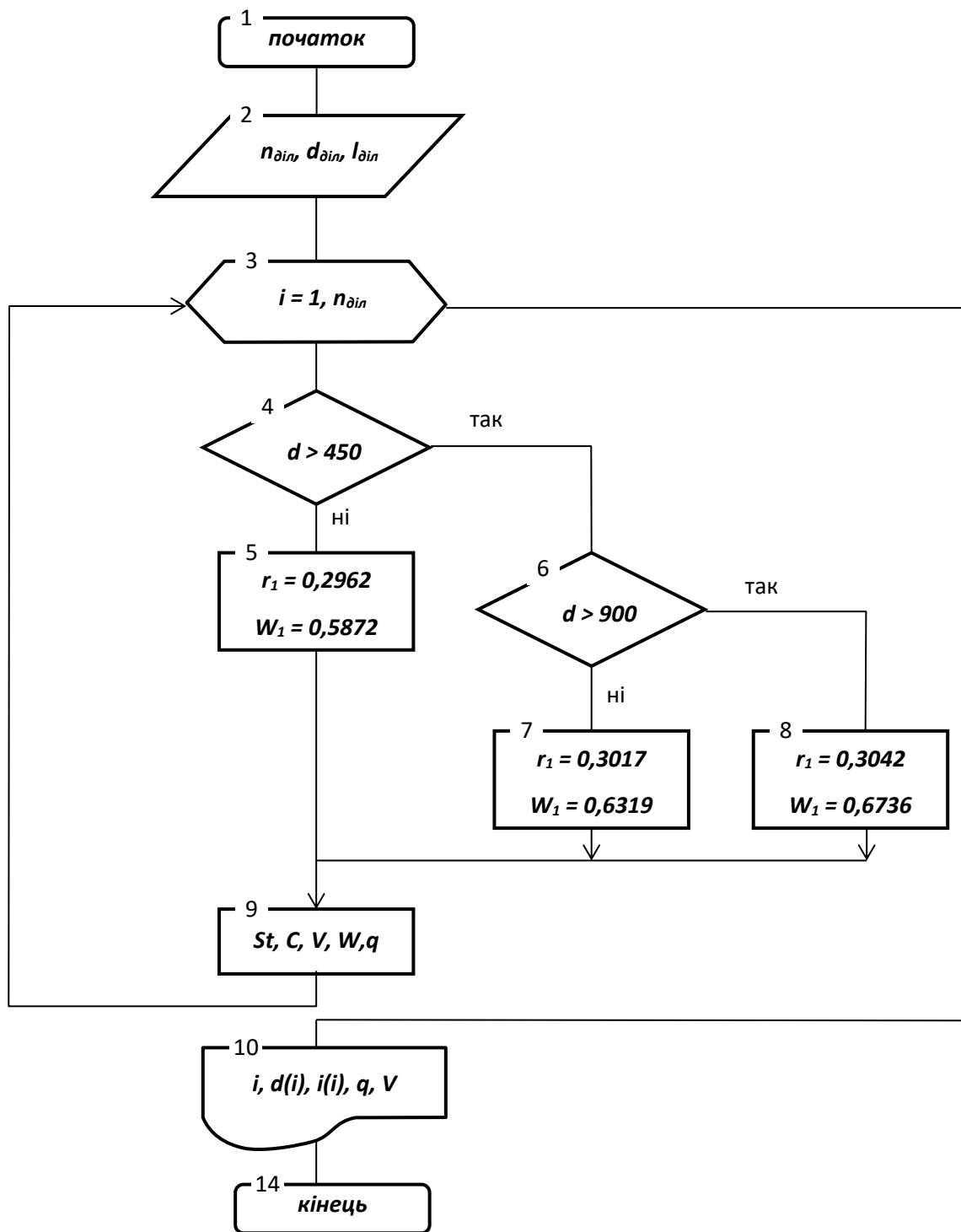


Рисунок 8.7 - Блок-схема розрахунку максимальної пропускної можливості ділянки водовідведення

Витрати води на ділянці визначаються за формулою

$$Q = v w ,$$

де w - площа живого потоку;

v - швидкість руху стоків, яка визначається за формулою

$$v = C \sqrt{R i} ,$$

C - коефіцієнт Шезі;

R - гідравлічний радіус

$$R = \frac{w}{\chi} ,$$

χ - змочений периметр;

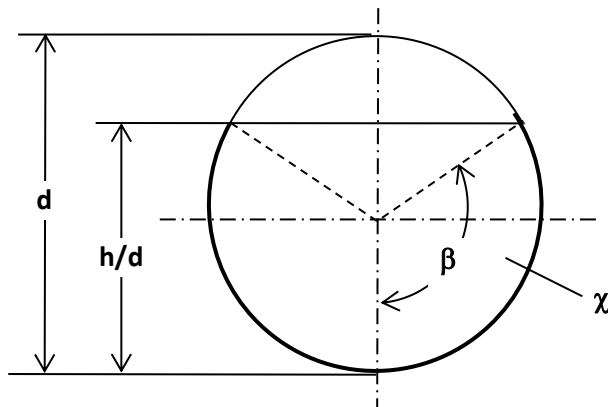
i - ухил ділянки.

Площа живого потоку визначається за формулою (при $\beta \geq 90^\circ$)

$$w = \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{\beta}{180^\circ} - \frac{\sin \beta \times \cos \beta}{\pi} \right) \right] \times d^2 ,$$

де β - допоміжний кут при визначенні площі живого потоку (рис. 8.8);

d - діаметр трубопроводу.



Цей алгоритм реалізовано в програмі **“Propkan.for”**. При цьому указані вище параметри обчислювались для труб з шершавістю $n=0,014$.

Рисунок 8.8 - Характеристики живого перерізу

4. Особливості блоків програм для розрахунків гідравлічних комплексів

Повний розрахунок гідравлічного комплексу виконується на основі 9 програм, які дозволяють визначити окремі його параметри:

- програма **“Rashoz.for”** для розрахунку витрат на господарсько-питні потреби міста;
- програма **“Raspoll.for”** для розрахунку витрат води на поливку вулиць і зелених насаджень в місті;
- програма **“Hozprom.for”** для розрахунку добових витрат на господарсько-питні потреби промислових підприємств;
- програма **“Rejsyt.for”** для розрахунку режиму витрачання води на потреби міста;
- програми **“Bakrej2s.for”** і **“Bakrej3s.for”** для вибору режиму насосної станції і розрахунку регулюючої ємності баку;
- програма **“Uzlgorl.for”** для розрахунку шляхових і вузлових витрат для міста в цілому;
- програма **“Diamkol.for”** для визначення розрахункових витрат і діаметрів ділянок кільцевих мереж;
- програма **“Gidrast1.for”** для ув'язки кільцевої водопровідної мережі;
- програма **“Napor.for”** для розрахунку п'єзометричних і вільних напорів в водопровідній мережі.

Крім цих програм, для забезпечення всіх розрахунків необхідно також ввести в комп'ютер файли:

- **“Typik2.dia”**, який являє собою таблицю стандартних умовних проходів труб з різних матеріалів;
- **“Rejgor2.dat”**, який являє собою таблицю розподілу витрат води за годинами доби в залежності від коефіцієнту годинної нерівномірності.

Цей блок програм дозволяє практично весь розрахунок кільцевої мережі виконати на ЕОМ. При цьому після розрахунку вихідного варіанту гідравлічного комплексу в ЕОМ будують внесені всі його вихідні дані. Тому подальший аналіз роботи такого комплексу зведеться до внесення незначних корективів в вихідні дані, які будуть диктуватися конкретними задачами аналізу, з послідовними розрахунками для одержання відповіді на ті питання, які ставить перед собою дослідник.

Методика користування цим блоком програм приведена в методичних вказівках [8].

Питання для самоконтролю

1. Чим відрізняється розрахунок мереж при двоступеневій та триступеневій подачі?
2. Які особливості складання алгоритму ув'язки водопровідної мережі з контролюванням тисків в ряді її вузлів
3. Які особливості мають гідравлічні розрахунки при реконструкції діючих мереж водовідведення?
4. На основі яких програм виконується повний розрахунок гідравлічного комплексу?

2. Практична частина

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1. Вибір оптимального варіанту для апроксимації напірно-витратної характеристики насосу

До початку практичних занять необхідно вивчити матеріал лекцій за темою №1 (питання 1 і 2) [1].

Запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу, який вивчається:

1. Що відноситься до місцевих природних факторів, які впливають на елементи систем водопостачання і в чому цей вплив виявляється?
2. В чому зміст врахування динаміки роботи комплексів?
3. Як впливає на структуру системи водопостачання врахування вимог надійності?
4. В чому зміст техніко-економічного розрахунку систем подачі і розподілу води?
5. Охарактеризувати головні елементи систем подачі і розподілу води.

Задача №1. Напірно-витратна характеристика відцентрового насосу описується даними Q_1-H_1 , Q_2-H_2 , Q_3-H_3 , Q_4-H_4 , Q_5-H_5 , Q_6-H_6 , числові значення яких наведено в додатку А. Описати характеристику аналітично тричленом. Оцінити відхилення апроксимації від реальної характеристики за абсолютною величиною і в відсотках і зробити висновок про доцільність такої апроксимації.

Розв'язування типової задачі

Вихідні дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані до задачі №1

Напір, м	72	70	67	65	60	57
Подача, л/с	110	125	133	139	156	167

За умовою задачі рівняння, яке описує характеристику насоса, має загальний вигляд:

$$H = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2.$$

Для того, щоб користуватися цим рівнянням, необхідно за умовами задачі визначити величину коефіцієнтів a_0 , a_1 і a_2 . З цією метою треба скласти систему із трьох рівнянь за даними таблиці і розв'язати їх любим відомим студенту методом відносно невідомих коефіцієнтів.

При складанні рівнянь рекомендується величини напорів і витрат взяти на крайніх межах і в середині таблиці. Тоді система рівнянь може мати такий вигляд:

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 110 + a_2 \times 110^2 \\ 67 = a_0 + a_1 \times 133 + a_2 \times 133^2 \\ 57 = a_0 + a_1 \times 167 + a_2 \times 167^2 \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 110 + a_2 \times 12100 \\ 67 = a_0 + a_1 \times 133 + a_2 \times 17689 \\ 57 = a_0 + a_1 \times 167 + a_2 \times 27889 \end{cases}$$

Якщо від першого рівняння відняти друге, отримаємо:

$$5 = -23 a_1 - 5589 a_2 .$$

Виразимо з цього рівняння коефіцієнт a_1 через коефіцієнт a_2 і результат підставимо в третє рівняння. Тоді одержимо:

$$a_1 = - \frac{5 + 5589 a_2}{23} = - 0,217 - 243 a_2 .$$

$$57 = a_0 + 167 (-0,217 - 243 a_2) + 27889 a_2 ,$$

$$57 = a_0 - 36,24 - 40581 a_2 + 27889 a_2 ,$$

$$93,24 = a_0 - 12692 a_2, \quad a_0 = 93,24 + 12692 a_2.$$

Підставимо величини a_1 і a_2 в перше рівняння:

$$72 = 93,24 + 12692 a_2 + 110 (-0,217 - 243 a_2) + 12100 a_2$$

Розв'язуючи це рівняння, отримаємо

$$0 = 21,24 + 12692 a_2 - 23,87 - 26730 a_2 + 12100 a_2 ,$$

$$0 = - 2,63 - 1938 a_2, \quad a_2 = -0,00136.$$

Підставимо a_2 в вираз для a_1 . Одержимо

$$a_1 = -0,217 + 243 \times 0,00136 = 0,11 .$$

Визначимо величину коефіцієнта a_0

$$A_0 = 93,24 - 12692 \times 0,00136 = 93,24 - 17,26 = 75,98 .$$

Тоді аналітичний вираз для характеристики буде:

$$H = 75,98 + 0,11 Q - 0,00136 Q^2 .$$

Для оцінки відхилення апроксимації від реальної характеристики визначимо напір насоса в наведених точках характеристики, користуючись отриманим рівнянням. Тоді:

при $H_1=72\text{м}$

$$H_{1p} = 75,98 + 0,11 \times 110 - 0,00136 \times 110^2 = 75,98 + 12,1 - 16,46 = 71,62 \text{ м};$$

(H_{1p} - напір, який визначено за отриманою формулою);

при $H=70\text{м}$

$$H_{2p} = 75,98 + 0,11 \times 125 - 0,00136 \times 125^2 = 75,98 + 13,75 - 21,25 = 68,48 \text{ м};$$

при $H=67\text{м}$

$$H_{3p} = 75,98 + 0,11 \times 133 - 0,00136 \times 133^2 = 75,98 + 14,63 - 24,06 = 66,55 \text{ м};$$

при $H=65\text{м}$

$$H_{4p} = 75,98 + 0,11 \times 139 - 0,00136 \times 139^2 = 75,98 + 15,29 - 26,28 = 64,99 \text{ м};$$

при $H=60\text{м}$

$$H_{5p} = 75,98 + 0,11 \times 156 - 0,00136 \times 156^2 = 75,98 + 17,16 - 33,1 = 60,04 \text{ м};$$

при $H=57\text{м}$

$$H_{6p} = 75,98 + 0,11 \times 167 - 0,00136 \times 167^2 = 75,98 + 18,37 - 37,93 = 56,42 \text{ м}.$$

Співставлення реальних і розрахункових точок доцільно звести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Оцінка відхилення фактичних і розрахункових напорів

Напір реальний, м	72	70	67	65	60	57
Напір розрахунковий, м	71,62	68,48	66,55	64,99	60,04	56,42
Абсолютне відхилення, м	0,38	1,52	0,45	0,01	-0,04	0,58
Відносне відхилення, %	0,5	2,17	0,67	0,02	-0,07	1,02

З останньої таблиці видно, що апроксимація у вигляді тричлена дає достатню точність.

Задача №2. Для умов попередньої задачі описати характеристику аналітично двочленом, якщо в якості розрахункових витрат і напорів приймати різні пари напорів:

I варіант – крайні значення (тобто $H_1=72\text{м}$ і $H_2=57\text{м}$);

II варіант – один з крайніх значень напорів і один з середніх ($H_1=72\text{м}$ і $H_2=57\text{м}$);

III варіант – два середніх значення ($H_1=70\text{м}$ і $H_2=60\text{м}$);

IV варіант – середні коефіцієнти по трьох попередніх варіантах.

Для кожного варіанту знайти абсолютні і відносні відхилення для всіх точок характеристики, які даються в вихідних даних. Вибрати оптимальний варіант для апроксимації характеристики двочленом.

Розв'язування типової задачі

Загальний вигляд рівняння напірно-витратної характеристики при описанні її двочленом має вигляд:

$$H = a_0 + a_1 Q^2 .$$

Відповідно до умови задачі необхідно для кожного з чотирьох варіантів визначити величини коефіцієнтів a_0 і a_1 , написати відповідні рівняння, співставити величини напорів, які обчислені за цими рівняннями в характерних точках, з відповідними напорами вихідної напірно-витратної характеристики і визначити абсолютні і відносні відхилення. Після цього співставити між собою отримані для кожного варіанту відносні відхилення і зробити висновок відносно доцільності вибору розрахункових точок на характеристиці Q-H насосів.

I варіант. Система рівнянь буде мати вигляд

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 110^2 \\ 57 = a_0 + a_1 \times 167^2 \end{cases} ,$$

або

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 12100, \\ 57 = a_0 + a_1 \times 27889. \end{cases}$$

Віднімемо від першого рівняння друге. Отримаємо

$$\begin{aligned} 15 &= (12100 - 27889) a_1 , \\ 15 &= - 15789 a_1 , & a_1 &= - 0,00095. \end{aligned}$$

Підставимо в перше рівняння величину a_1 і знайдемо a_0 .

$$\begin{aligned} 72 &= a_0 - 0,00095 \times 12100, \\ a_0 &= 72 + 11,5 = 83,5. \end{aligned}$$

Для першого варіанту рівняння буде мати такий вигляд:

$$H = 83,5 - 0,00095 Q^2.$$

Визначимо величини напорів для відповідних точок вихідної характеристики:

при $H_1=72\text{м}$

$$H_{1p} = 83,5 - 0,00095 \times 110^2 = 83,5 - 0,00095 \times 12100 = 83,5 - 11,5 = 72\text{м} ;$$

при $H_2=70\text{м}$

$$H_{2p} = 83,5 - 0,00095 \times 125^2 = 83,5 - 14,84 = 68,66 \text{ м} ;$$

при $H_3=67\text{м}$

$$H_{3p} = 83,5 - 0,00095 \times 133^2 = 83,5 - 16,80 = 66,70 \text{ м} ;$$

при $H_4=65\text{м}$

$$H_{4p} = 83,5 - 0,00095 \times 139^2 = 83,5 - 18,35 = 65,15 \text{ м} ;$$

при $H_5=60\text{м}$

$H_{5p} = 83,5 - 0,00095 \times 156^2 = 83,5 - 23,12 = 60,38 \text{ м} ;$
 при $H_6=57\text{м}$
 $H_{6p} = 83,5 - 0,00095 \times 167^2 = 83,5 - 26,49 = 57,00 \text{ м} .$
 Розрахунок відхилень зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Оцінка відхилень фактичних і розрахункових напорів для I варіанту

Напір реальний, м	72	70	67	65	60	57
Напір розрахунковий, м	72	68,66	66,7	65,15	60,38	57,0
Абсолютне відхилення, м	0	1,34	0,3	-0,15	-0,38	0
Відносне відхилення, %	0	1,9	0,4	-0,2	-0,6	0

II варіант. Система рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 12100 \\ 67 = a_0 + a_1 \times 133^2 \end{cases},$$

або

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 \times 12100, \\ 67 = a_0 + a_1 \times 17689. \end{cases}$$

Віднявши з першого рівняння друге, одержимо

$$5 = - 5589 a_1 .$$

Тоді

$$a_1 = - 0,00089.$$

Підставивши величину a_1 в перше рівняння, одержимо:

$$\begin{aligned} 72 &= a_0 - 0,00089 \times 12100, \\ 72 &= a_0 - 10,77, \quad a_0 = 82,77. \end{aligned}$$

Аналітична характеристика буде мати вигляд:

$$H = 82,77 - 0,00089 \times Q^2.$$

Знаходимо напори насоса в характерних точках:

при $H_1=72\text{м}$

$$H_{1p} = 82,77 - 0,00089 \times 110^2 = 82,77 - 10,77 = 72\text{м} ;$$

при $H_2=70\text{м}$

$$H_{2p} = 82,77 - 0,00089 \times 125^2 = 82,77 - 13,91 = 68,9 \text{ м} ;$$

при $H_3=67\text{м}$

$$H_{3p} = 82,77 - 0,00089 \times 133^2 = 82,77 - 15,74 = 67,03 \text{ м} ;$$

при $H_4=65\text{м}$

$$H_{4p} = 82,77 - 0,00089 \times 139^2 = 82,77 - 17,19 = 65,58 \text{ м} ;$$

при $H_5=60\text{м}$

$$H_{5p} = 82,77 - 0,00089 \times 156^2 = 82,77 - 21,66 = 61,11 \text{ м} ;$$

при $H_6=57\text{м}$

$$H_{6p} = 82,77 - 0,00089 \times 167^2 = 82,77 - 24,82 = 57,95 \text{ м} .$$

Розрахунок відхилень зводимо в табл. 4.

Таблиця 4 – Оцінка відхилень фактичних і розрахункових напорів для II варіанту

Напір реальний, м	72	70	67	65	60	57
Напір розрахунковий, м	72	68,9	67,03	65,58	61,11	57,95
Абсолютне відхилення, м	0	1,1	-0,03	-0,58	-1,11	-0,95
Відносне відхилення, %	0	1,6	-0,04	-0,9	-1,85	-1,67

Апроксимація в основному завищує напори.

III варіант. Система рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} 70 = a_0 + a_1 \times 125^2 \\ 60 = a_0 + a_1 \times 156^2 \end{cases} ,$$

або

$$\begin{cases} 70 = a_0 + a_1 \times 15625, \\ 60 = a_0 + a_1 \times 24336. \end{cases}$$

Від першого рівняння віднімемо друге. Тоді одержимо

$$10 - (15625 - 24336)a_1 = -8711a_1,$$

Тоді

$$a_1 = - 0,0011.$$

З першого рівняння знайдемо коефіцієнт a_0 :

$$\begin{aligned} 70 &= a_0 - 0,0011 \times 15625, \\ 70 &= a_0 - 17,19, \quad a_0 = 87,19. \end{aligned}$$

Аналітична характеристика в III випадку буде мати вигляд

$$H = 87,19 - 0,0011 \times Q^2.$$

Знаходимо напори насоса в характерних точках :

при $H_1=72\text{м}$

$$H_{1p} = 87,19 - 0,0011 \times 110^2 = 87,19 - 13,31 = 73,88\text{м} ;$$

при $H_2=70\text{м}$

$$H_{2p} = 87,19 - 0,0011 \times 125^2 = 87,19 - 17,19 = 70 \text{ м} ;$$

при $H_3=67\text{м}$

$$H_{3p} = 87,19 - 0,0011 \times 133^2 = 87,19 - 19,46 = 67,73 \text{ м} ;$$

при $H_4=65\text{м}$

$$H_{4p} = 87,19 - 0,0011 \times 139^2 = 87,19 - 21,25 = 65,94 \text{ м} ;$$

при $H_5=60\text{м}$

$$H_{5p} = 87,19 - 0,0011 \times 156^2 = 87,19 - 26,77 = 60,42 \text{ м} ;$$

при $H_6=57\text{м}$

$$H_{6p} = 87,19 - 0,0011 \times 167^2 = 87,19 - 30,68 = 56,51 \text{ м} .$$

Розрахунок відхилень зводимо в табл. 5.

Таблиця 5 – Оцінка відхилень фактичних і розрахункових напорів для III варіанту

Напір реальний, м	72	70	67	65	60	57
Напір розрахунковий, м	73,88	70	67,73	65,94	60,42	56,51
Абсолютне відхилення, м	-1,88	0	-0,73	-0,94	-0,42	0,49
Відносне відхилення, %	-2,6	0	-1,1	-1,4	-0,7	0,9

Апроксимація в основному завищує напори.

IV варіант. В цьому варіанті величини a_0 і a_1 визначаються як середні по трьох попередніх значеннях, тобто:

$$a_0 = \frac{83,5 + 82,77 + 87,19}{3} = 84,49,$$

$$a_1 = \frac{-0,00095 - 0,00089 - 0,0011}{3} = -0,00098.$$

Аналітичне рівняння буде мати вигляд

$$H = 84,49 - 0,00098 \times Q^2.$$

Знаходимо напори насоса в характерних точках:

при $H_1=72\text{м}$

$$H_{1p} = 84,49 - 0,00098 \times 110^2 = 84,49 - 11,86 = 72,63\text{м} ;$$

при $H_2=70\text{м}$

$$H_{2p} = 84,49 - 0,00098 \times 125^2 = 84,49 - 15,31 = 69,18 \text{ м ;}$$

при $H_3=67\text{м}$

$$H_{3p} = 84,49 - 0,00098 \times 133^2 = 84,49 - 17,33 = 67,16 \text{ м ;}$$

при $H_4=65\text{м}$

$$H_{4p} = 84,49 - 0,00098 \times 139^2 = 84,49 - 18,93 = 65,56 \text{ м ;}$$

при $H_5=60\text{м}$

$$H_{5p} = 84,49 - 0,00098 \times 156^2 = 84,49 - 23,85 = 60,64 \text{ м ;}$$

при $H_6=57\text{м}$

$$H_{6p} = 84,49 - 0,00098 \times 167^2 = 84,49 - 27,33 = 57,16 \text{ м .}$$

Розрахунок відхилень зводимо в табл. 6.

Таблиця 6 – Оцінка відхилень фактичних і розрахункових напорів для III варіанту

Напір реальний, м	72	70	67	65	60	57
Напір розрахунковий, м	72,63	69,18	67,16	65,56	60,64	57,16
Абсолютне відхилення, м	-0,63	0,82	-0,16	-0,56	-0,64	-0,16
Відносне відхилення, %	-0,9	1,2	-0,2	-0,9	-1,1	-0,3

Апроксимація в IV варіанті в основному завищує напори.

Порівняння отриманих результатів показує, що найбільш раціональним слід визнати перший варіант тому, що всі інші варіанти завищують напори, а відносне відхилення результатів для всіх варіантів близьке.

Задача №3. Для умов задачі №1 написати апроксимуючі вирази для випадку паралельної роботи n однакових насосів при апроксимації у вигляді тричлена і двочлена. Кількість насосів, які працюють паралельно прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

У випадку паралельної роботи насосів їх подачі додаються. Якщо насоси однакові загальною кількістю n , то рівняння Q - H будуть відповідно мати вигляд:

- при тричленному рівнянні

-

$$H = a_0 + a_1 (nQ_1) + a_2 (nQ_1)^2 ,$$

- при двочленному рівнянні

-

$$H = a_0 + a_1 (nQ_1)^2 ,$$

де Q_1 – подача одного насоса.

Аналогічно розв'язування задачі №1 система рівнянь буде мати вигляд:

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1(nQ_1) + a_2(nQ_1)^2, \\ 67 = a_0 + a_1(nQ_2) + a_2(nQ_2)^2, \\ 57 = a_0 + a_1(nQ_3) + a_2(nQ_3)^2. \end{cases}$$

З першого і другого рівнянь знаходимо

$$\begin{aligned} 5 &= (Q_1 - Q_2)a_1n + (Q_1^2 - Q_2^2)a_2n^2. \\ \text{Звідки} \quad a_1 &= \frac{5 - (Q_1^2 - Q_2^2)n^2a_2}{(Q_1 - Q_2)n} = \frac{5 - (110^2 - 133^2)n^2a_2}{(110 - 133)n} = \\ &= -\frac{5 + 5589n^2a_2}{23n} = -0,217/n - 243a_2n \end{aligned}$$

Підставимо значення a_1 в третє рівняння. Тоді

$$\begin{aligned} 57 &= a_0 - (0,217/n + 243a_2n)n^2 + a_2n^2Q_3^2, \\ 57 &= a_0 - 36,24 - 40581n^2a_2 + 27889n^2a_2, \\ 93,24 &= a_0 - 12692n^2a_2. \end{aligned}$$

Звідси

$$a_0 = 93,24 + 12692n^2a_2.$$

Щоб визначити величину a_2 , підставимо вирази a_0 і a_1 в перше рівняння. В результаті отримаємо

$$\begin{aligned} 72 &= 93,24 + 12692n^2a_2 - 110n(0,217/n + 243a_2n) + 110^2a_2n^2, \\ 72 &= 93,24 + 12692n^2a_2 - 23,87 - 26730a_2n^2 + 12100a_2n^2, \\ 0 &= -2,63 - 1938a_2n^2. \end{aligned}$$

Тоді

$$a_2 = -\frac{2,63}{1938 \times n^2} = -\frac{0,00136}{n^2},$$

а величини коефіцієнтів a_1 і a_0 будуть

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{0,217}{n} - 243 \left(-\frac{0,00136}{n^2} \right) n = -\frac{0,217}{n} + \frac{0,33}{n} = \frac{0,11}{n}, \\ a_0 &= 93,24 - 12692 \frac{0,00136}{n^2} n^2 = 93,24 - 17,26 = 75,98. \end{aligned}$$

Таким чином, при паралельній роботі і тричленній формулі залежність Q - H описується виразом

$$H = 75,98 + \frac{0,11}{n}Q - \frac{0,00136}{n^2}Q^2.$$

При двох насосах, які працюють паралельно

$$H = 75,98 + \frac{0,11}{2} Q - \frac{0,00136}{2^2} Q^2,$$

$$H = 75,98 + 0,055Q - 0,00034Q^2.$$

При двочленному рівнянні одержимо систему

$$\begin{cases} 72 = a_0 + a_1 (nQ_1)^2, \\ 57 = a_0 + a_1 (nQ_2)^2. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему отримаємо

$$\begin{aligned} 15 &= -a_1 n^2 (Q_2^2 - Q_1^2), \\ a_1 &= -15 / (n^2 (Q_2^2 - Q_1^2)), \end{aligned}$$

При $n=2$ (за умовою задачі), одержимо

$$a_1 = - \frac{15}{2^2 (167^2 - 110^2)} = - \frac{3.75}{27889 - 12100} = -0,00024$$

і

$$a_0 = 72 - a_1 (nQ_1)^2 = 72 + 0,00024 (2 \times 110)^2 = 72 + 11.62 = 83.6.$$

Тоді рівняння Q - H характеристики при двох однакових насосів, які працюють паралельно, буде:

$$H = 83,6 - 0,00096 Q^2$$

або у загальному вигляді для будь-якої кількості насосів

$$H = 83,6 - 0,00024 (nQ)^2.$$

Задача №4. Для умов задачі №1 написати апроксимуючі вирази для випадку послідовної роботи n однакових насосів при апроксимації у вигляді тричлена і двочлена. Кількість насосів, які працюють послідовно прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

При послідовній роботі насосів напір загальної групи буде

$$H_{\text{посл}} = n H_1,$$

де n – кількість насосів, які працюють послідовно;

H_1 - напір одного насоса при подачі витрати Q .

Тоді при трьохчленному рівнянні

$$H_{\text{посл}} = n (a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2).$$

Якщо в групі буде два насоса, то використовуючи рівняння із задачі №1 отримаємо

$$H_{\text{посл}} = 2 (75,98 + 0,11 Q - 0,00136 Q^2)$$

або

$$H_{\text{посл}} = 151,96 + 0,22 Q - 0,00272 Q^2.$$

Для двочлена із задачі №2 характеристика послідовної роботи може бути описана виразом

$$\begin{aligned} H_{\text{посл}} &= n (a_0 + a_1 Q^2), \\ H_{\text{посл}} &= 2 (83,5 - 0,00095 Q^2), \\ H_{\text{посл}} &= 167 - 0,0019 Q^2. \end{aligned}$$

Практичне заняття 2 Аналіз роботи помпового обладнання

Питання для самоконтролю

1. Якою аналітичною залежністю можна описати напірно-витратну характеристику відцентрового насоса?
2. Якою аналітичною залежністю можна описати напірно-витратну характеристику поршневого насоса?
3. Як описуються характеристики напірних і безнапірних резервуарів?
4. Яку аналітичну характеристику мають пневматичні установки?

Задача №1. Написати рівняння напірно-витратної характеристики поршневого насоса, як функцію потужності. Визначити, як зміниться напір насоса, якщо потужність двигуна зросте в K разів. Величину K прийняти згідно з додатком А.

Розв'язування типової задачі

У поршневого насоса подача не залежить від напору, який ним створюється, тобто

$$Q = \text{const}.$$

Напір такого насоса залежить від потужності двигуна і міцності корпусу.

Потужність приводу описується виразом

$$N = K_1 \frac{\rho g Q H}{1000 \eta_n \eta_n},$$

де Q – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$,

H - напір, м ;

K_1 - коефіцієнт запасу;

η_n і η_n - ККД відповідно насоса і передачі;

ρ - щільність рідини.

Тоді залежність напору від потужності двигуна буде мати вигляд

$$H = 1000 \frac{\eta_n \eta_n}{K_1 \rho g Q} N$$

або для води

$$H = \frac{\eta_n \eta_n}{K_1 g Q} N.$$

Якщо потужність зросте в K разів, то насос розвине напір

$$H' = \frac{\eta_n' \eta_n'}{K_1 g Q} K N.$$

Тоді співвідношення напорів поршневого насоса з різними двигунами описується виразом

$$\frac{H'}{H} = \frac{\eta_n' \eta_n' K N K_1 g Q}{K_1 g Q \eta_n \eta_n} = \frac{\eta_n' \eta_n'}{\eta_n \eta_n} K.$$

Якщо знехтувати зміною ККД насоса і двигуна при різній потужності, то

$$\frac{H'}{H} = K.$$

Звідки

$$H' = K H.$$

Наприклад, при зростанні потужності в 2 рази, тобто, коли $K=2$, напір теж зростає в 2 рази

$$H' = 2 H.$$

Задача №2. Визначити, який теоретично можливий напір в точках місцевості з позначками Z_1 , Z_2 і Z_3 , якщо мережа одержує воду з напірного резервуара глибиною 4м, який знаходиться на позначці Z_4 . Втратами в мережі знехтувати. Числові значення позначок прийняти згідно з додатком А.

Розв'язування типової задачі

Характеристика напірного резервуара

$$H = const.$$

Нехай

$$Z_1 = 95\text{м}, \quad Z_2 = 72\text{м}, \quad Z_3 = 88\text{м}, \quad Z_4 = 120 \text{ м}.$$

Тоді характеристика напірного резервуара буде

$$H = Z_4 + 4 = 120 + 4 = 124 \text{ м}.$$

Якщо втрати в мережі незначні, то п'єзометричні позначки співпадають з характеристикою напірного резервуара. Тоді, якщо врахувати, що

$$P_i = H_{ei} + Z_i,$$

$$H_{gi} = P_i - Z_i .$$

Теоретично можливі максимальні вільні напори в точках з позначками Z_1 , Z_2 і Z_3 будуть

$$H_1 = 124 - 95 = 29 \text{ м},$$

$$H_2 = 124 - 72 = 52 \text{ м},$$

$$H_3 = 124 - 88 = 36 \text{ м} .$$

Задача №3. Визначити напір в мережі, яка живиться від пневматичної установки змінного тиску, якщо об'єм повітря спочатку в ній був W_1 при абсолютному тиску P_1 , а потім змінився до величини W_2 . Чисельні значення прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Характеристика пневматичної установки змінного тиску має вигляд

$$pW = const.$$

Тоді зміна тиску і об'єму повітря буде описуватися рівнянням

$$p_1 W_1 = p_2 W_2 .$$

Якщо на початку тиск був $p_1=0,3\text{МПа}$, при об'ємі повітря $W_1=2\text{м}^3$, то при зміні об'єму повітря до величини $W_2=2,5\text{м}^3$ тиск в мережі стане дорівнювати

$$p_2 = p_1 W_1/W_2 = 0,3 \times 2/2,5 = 0,24 \text{ МПа} .$$

Задача №4. Побудувати графік зміни витрати води, яка надходить в бак для запасу води висотою $H_{бак}$, $Q=f(H_{бак})$. Вода поступає в бак по трубопроводу $d=100\text{мм}$, який вварено в нього на рівні дна. Тиск на виході із труби на початку заповнення p_n . Чисельні значення прийняти згідно з додатком А.

Розв'язування типової задачі

Припустимо, що висота баку 4м, а напір на початку його заповнення був бм.вод.ст. Запасний бак при тому способі подачі в нього води, який указано в умовах задачі, буде працювати в режимі нефіксованого відбору. Величина витрати, яка надходить в бак, визначається залежністю

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_{бак}} ,$$

де $\mu=0,62$ – коефіцієнт витрати,

ω - площа перерізу отвору

$$\omega = \pi D^2/4 = 3,14 \times 0,1^2/4 = 0,00785 \text{ м}^2 .$$

Тоді формула для витрати води, яка надходить в бак, буде мати вигляд

$$Q = 0,62 \times 0,00785 \sqrt{2gH_{\text{бак}}} = 0,0216 \sqrt{H_{\text{бак}}}.$$

Знаходимо величини витрат води при різних рівнях заповнення баку. Для цього необхідно послідовно задаватися глибиною води в ньому і для кожної глибини визначати витрату води, що надходить в бак. Кількість розрахункових глибин не повинна бути меншою трьох. Розрахунок графіка доцільно зводити в таблицю 7.

Таблиця 7 – Розрахунок залежності $Q=f(H_0)$

Глибина води в баці, м	0	1	2	3	4
Напір на виході з труби, м	6	5	4	3	2
Надходження води в бак, л/с	52,9	48,3	43,2	37,4	30,5

Користуючись цією таблицею будуюмо графік функції $Q=f(H_{\text{бак}})$ (рис.1).

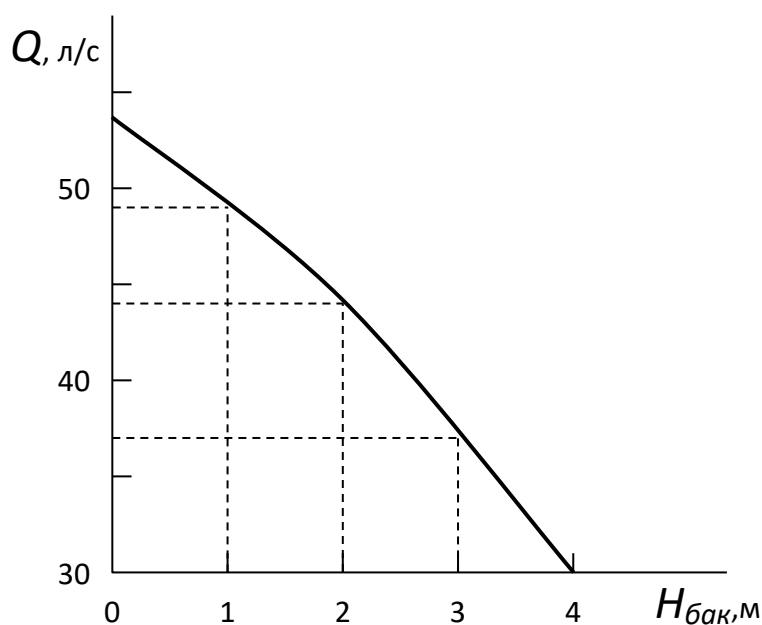


Рисунок 1 – Залежність $Q=f(H)$.

Практичне заняття 3. Аналіз математичної моделі системи водопостачання з розгалуженими мережами

До початку практичного заняття необхідно вивчити матеріал лекцій за темою №2 (питання 3) [1].

Запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу, який вивчається:

- Що таке найпростіша система і чим вона характеризується?
- Як впливає величина відбору між водоживлювачами на характер руху води між ними?
- Що таке критична витрата і від чого вона залежить?

- Від чого залежить максимальна витрата, яка може бути відібрана з системи?

Задача №1. Визначити, при якій максимальній витраті буде спостерігатися перетік з гірського резервуара №1, який розташовано вище, в нижній резервуар, якщо відстань між розрахунковими рівнями води в них дорівнює ΔH . Загальний опір водогонів від резервуара №1 до точки відбору S_4 , а від точки відбору до резервуара №2 – S_5 . Чисельні величини вихідних даних прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Дано: $\Delta H=20\text{м}$, $S_4=27$ (для витрати в $\text{м}^3/\text{с}$), $S_5=29$ (для витрати в $\text{м}^3/\text{с}$).

Найпростіша схема має вигляд, який показано на рис. 4.

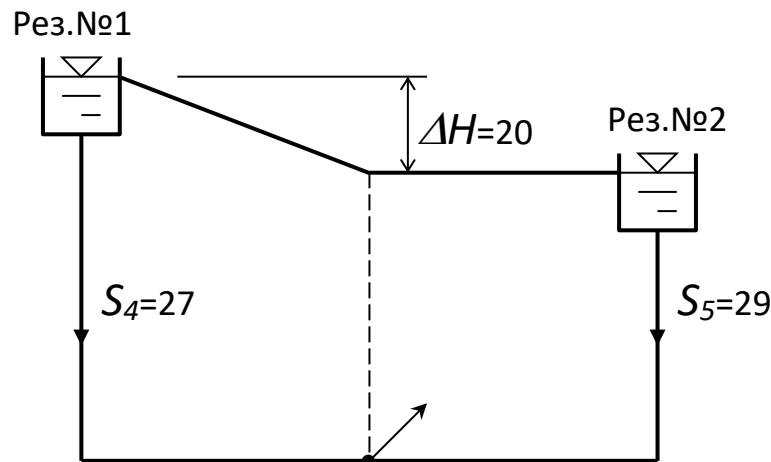


Рисунок 3.1 – Система з двома резервуарами

Перетік з одного резервуару в другий буде спостерігатися у тому випадку, коли витрата в системі буде трохи меншою критичної витрати, яка визначається за формулою:

$$Q_{кр} = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{S_4}} = \sqrt{\frac{\Delta H}{S_4}} = \sqrt{\frac{20}{27}} = 0,86 \text{ м}^3/\text{с} .$$

Якщо прийняти за мінімальну витрату, яка може надходити в резервуар №2, $Q_{\min}=1\text{л/с}$, то перетік з одного резервуару в другий буде спостерігатися у всіх випадках, коли

$$Q_i \leq Q_{кр} - Q_{\min} = 0,860 - 0,001 = 0,859 \text{ м}^3/\text{с} .$$

Задача №2. За умовами попередньої задачі визначити, яка максимальна витрата може бути подана в населений пункт, який знаходиться в долині між обома резервуарами на позначках, які на 25м менше позначки рівня води в нижньому резервуарі. Допустимий мінімальний вільний напір в населеному пункті 18м.

Розв'язування типової задачі

Максимальна витрата, яка може бути подана в систему, визначається за формулою:

$$Q_{\text{макс}} = Q_{\text{макс.1}} + Q_{\text{макс.2}} ,$$

де $Q_{\text{макс.1}}$ і $Q_{\text{макс.2}}$ – можливі максимальні витрати води від першого і другого резервуарів відповідно.

$$Q_{\text{макс.1}} = \sqrt{\frac{H_1 - H_{\text{в мін}}}{S_4}} ,$$

де $H_{\text{в мін}}$ – допустимий мінімальний вільний напір в населеному пункті,

$$H_{\text{в мін}} = 18 \text{ м};$$

H_1 - висота резервуару №1 відносно населеного пункту

$$H_1 = \Delta H + 25 = 20 + 25 = 45 \text{ м.}$$

Тоді

$$Q_{\text{макс.1}} = \sqrt{\frac{45-18}{27}} = 1 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Максимальна витрата, яка може бути подана до резервуару №2, буде

$$Q_{\text{макс.2}} = \sqrt{\frac{H_2 - H_{\text{в мін}}}{S_5}} = \sqrt{\frac{25-18}{29}} = 0,491 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Таким чином, в населеному пункті обидва резервуари можуть подати витрату не більше

$$Q_{\text{макс.}} = 1 + 0,491 = 1,491 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Задача №3. Для умов попередньої задачі визначити, якими повинні бути діаметри водогонів із сталевих труб при подачі води від резервуару №1 і №2, якщо їх довжини відповідно будуть l_1 і l_2 . Чисельні величини вихідних даних прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Дано: $l_1=5\text{км}$, $l_2=2\text{км}$, інші необхідні дані прийняти за результатами розв'язання попередньої задачі.

Діаметри відповідних водогонів визначаються, виходячи із наступних міркувань:

- треба спочатку визначити, які втрати напорів будуть в водогонах h ;
- враховуючи, що втрати напору пов'язані з діаметром залежністю
-

$$h = SQ^2 = S_0 l Q^2,$$

при відомих h , l і Q знайти S_0 , по якому можна визначити діаметри.

Втрати напору в водогонах від резервуару №1 до населеного пункту при максимальній витраті будуть

$$h_1 = H_1 - H_{\text{в.мін}} = 45 - 18 = 27 \text{ м.}$$

Втрати напору в водогоні від резервуару №2 до населеного пункту при максимальній витраті

$$h_2 = H_2 - H_{\text{в.мін}} = 25 - 18 = 7 \text{ м.}$$

Питомий опір для першого водогону повинен бути не більшим

$$S_{01} = h_1 / (l_1 Q_{1\text{ макс}}^2) = 27 / (5000 \times 1^2) = 0,0054 \text{ (для витрати в м}^3\text{/с).}$$

За таблицями Шевельова Ф.А. [2] у ненових сталевих труб $d=800\text{мм}$ $S_{01}=0,005514$, а $d=900\text{мм}$ – $S_{01} = 0,002962$. Таким чином, від першого резервуару до населеного пункту водогін частково приймається $d=900\text{мм}$, а частково 800мм так, щоб загальні втрати в ньому були 27 м , тобто,

$$h_1 + h_2 = 27 ,$$

де h_1 і h_2 - втрати напору в водогоні $d=800\text{мм}$ і $d=900\text{мм}$ відповідно.

$$S_{01} l'_1 Q_{1\text{ макс}}^2 + S'_{01} (5000 - l'_1) Q_{1\text{ макс}}^2 = 27 ,$$

де S_{01} і S'_{01} - питомі опори частини водогону $d=800\text{мм}$ і $d=900\text{мм}$ відповідно;

l'_1 - довжини водогону $d=800\text{мм}$, м;

$500 - l'_1$ - довжина водогону $d=900\text{мм}$, м.

Тоді

$$0,005514 l'_1 \times 1^2 + 0,002962 (5000 - l'_1) \times 1^2 = 27;$$

$$(0,005514 - 0,002962) l'_1 = 27 - 0,002962 \times 5000;$$

$$0,002552 l'_1 = 12,19.$$

Звідки довжина ділянки $d=800\text{мм}$ буде 4776 м . Тоді перші 224 м водогону повинні бути $d=900\text{мм}$.

Аналогічно визначаємо діаметр водогону від другого резервуару до населеного пункту

$$S_{02} = h_2 / (l_2 Q_{2\text{ макс}}^2) = 7 / (2000 \times 0,491^2) = 0,01452 \text{ (для витрати в м}^3\text{/с).}$$

За таблицями Шевельова Ф.А. [2] у ненових сталевих труб $d=600\text{мм}$ $S_{02}=0,02262$, а $d=700\text{мм}$ – $S_{02} = 0,01098$. Тоді

$$S_{02} l'_2 Q_{2\text{ макс}}^2 + S'_{02} (2000 - l'_2) Q_{2\text{ макс}}^2 = 7 ,$$

$$0,02262 l'_2 \times 0,491^2 + 0,01098 (2000 - l'_2) \times 0,491^2 = 7;$$

$$(0,005453 - 0,002647) l'_2 = 7 - 5,29;$$

$$l'_2 = 609\text{м.}$$

Таким чином, довжина ділянки $d=600\text{мм}$ повинна бути 609 м , а ділянки $d=700\text{мм}$ – 1391 м .

Задача №4. Для умов попередньої задачі і результатів її розв'язання розрахувати і побудувати графік сумісної роботи двох резервуарів на загальну мережу. Визначити межі характерних режимів.

Розв'язування типової задачі

Щоб побудувати графік сумісної роботи резервуарів, необхідно скорегувати їх характеристики на втрати напору на шляху від резервуару до точки відбору. Для цього необхідно з характеристики резервуару $H = \text{const}$ вирахувати втрати напору в водогоні, тобто,

$$H_{1i} = H_1 - h_i = H_1 - (S'_1 + S''_1) q_i^2,$$

де H_1 – висота першого резервуару,

h_{0-i} – втрати напору в водогоні від першого резервуару до точки відбору при витраті в ньому q_i ,

S'_1 і S''_1 – загальний опір кожної з ділянок водогону при витраті q_i .

$$S_1 = S_{01} l,$$

S_{01} і l – питомий опір і довжина відповідної ділянки.

Для побудовання графіка розраховується допоміжна таблиця 8. З цією ціллю необхідно максимально можливу подачу розбити на кілька відрізків, які повинні бути кратними 100 л/с (або 10 л/с при малих подачах) і для кожного визначити втрати напору в водогоні.

За умовами попередньої задачі від першого (вищого) резервуару вода подається в мережу спочатку водогоні $d=900\text{мм}$ з $S_0=0,002962$ довжиною 224 м, а потім водогоні $d=800\text{мм}$ з $S_0=0,005514$ (для витрат в $\text{м}^3/\text{с}$) довжиною 4776 м. Тоді

$$h_i = (0,002962 \times 224 + 0,005514 \times 4776) q_i^2 = 26,9984 q_i^2$$

Таблиця 3.1 – Розрахунок елементів характеристики першого резервуару

Витрата $q_i, \text{м}^3/\text{с}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h_i, \text{м}$	1,08	4,32	9,72	17,28	27,0
$H_{1i} = H_1 - h_i, \text{м}$	43,92	40,68	35,28	27,72	18,0

Від другого резервуару вода подається спочатку трубопроводом $d=700\text{мм}$ з $S_0=0,01098$ довжиною 1391 м, а потім трубопроводом $d=600\text{мм}$ з $S_0=0,002262$ довжиною 609 м. Тоді

$$h'_i = (0,01098 \times 1391 + 0,002262 \times 609) q_{i1}^2 = 29,0486 q_{i1}^2.$$

Максимальна подача від другого резервуару 0,491 $\text{м}^3/\text{с}$.

Допоміжна таблиця розраховується аналогічно першому резервуару.

Таблиця 3.2 – Розрахунок елементів характеристики другого резервуару

Витрата q_i , м ³ /с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
h'_i , м	0,29	1,16	2,61	4,65	7,26
$H_{2i} = H_2 - h'_i$, м	24,71	23,84	22,39	20,35	17,74

За даними таблиць 3.1 і 3.2 будуватиметься графік, що має вигляд, який приведено на

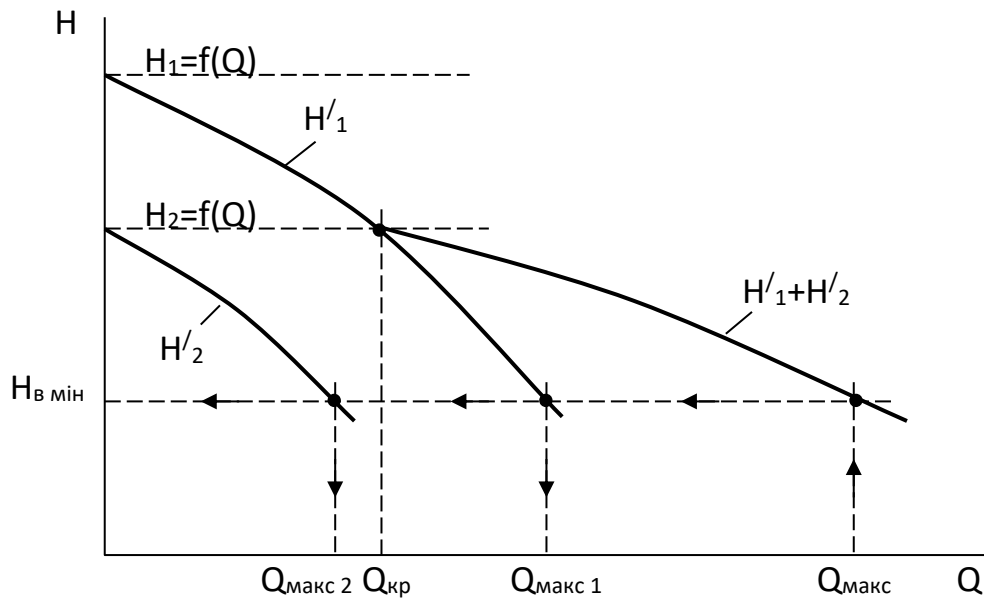


рис. 3.2.

Рисунок 3.2 – Графік сумісної роботи двох резервуарів на загальну мережу

На графіку сумісної роботи крива H'_1 будується за величинами H_{1i} (табл.3.1), крива H'_2 – за величинами H_{2i} (табл.9), крива $(H'_1 + H'_2)$ – шляхом складання абсцис кривих H'_1 і H'_2 при постійних дискретних значеннях ординат. Максимальне надходження з кожного із резервуарів можна знайти, якщо з точки $Q_{\text{макс}}$ провести вертикальну лінію до перетину з кривою $(H'_1 + H'_2)$, а потім провести горизонтальну лінію до перетину з кривими H'_1 і H'_2 . Ця лінія буде також на висоті мінімально допустимого вільного напору в мережі.

Точка, з якої обидва резервуари стануть водоживлювачами, відповідає критичній витраті. До $Q_{\text{кр}}$ вода буде перетікати з одного резервуару в другий, а при $Q > Q_{\text{кр}}$ вода в систему буде надходити з обох резервуарів.

Практичне заняття 4. Аналіз гідравлічних характеристик розгалужених мереж в комплексах

Задача №1.

Для мережі, яка наведена на рис 4.1, визначити еквівалентну подачу і оцінити можливу абсолютну і відносну максимальну помилку визначення напорів в вузлах, якщо вузол 6 буде невідповідним, місцевість плоска, а лінія живить дев'ятиповерхові будинки. Чисельні значення прийняти по додатку А.

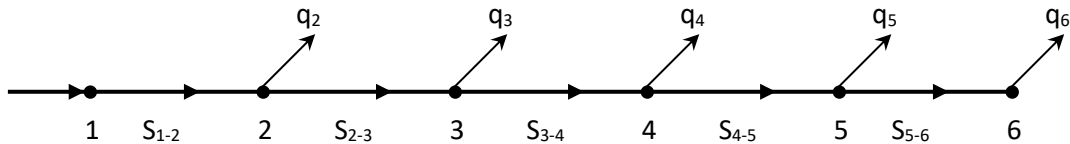


Рисунок 4. 1– Схема водопровідної мережі.

Розв'язування типової задачі

Дано: $q_2 = 10$ л/с; $q_3 = 20$ л/с; $q_4 = 10$ л/с; $q_5 = 20$ л/с; $q_6 = 20$ л/с;

$S_{1-2} = 0,001$; $S_{2-3} = 0,002$; $S_{3-4} = 0,003$; $S_{4-5} = 0,002$; $S_{5-6} = 0,004$ (всі опори даються для витрат в л/с).

Еквівалентна подача по мережі визначається за формулою:

$$Q_{екв} = \sqrt{\frac{h_{1-7}}{\sum S_i}},$$

де h_{1-6} – втрати напору в мережі від вузла 1 до вузла 6;

$\sum S_i$ – сума опорів ділянок від вузла 1 до вузла 6.

$$\sum S_i = S_{1-2} + S_{2-3} + S_{3-4} + S_{4-5} + S_{5-6} = 0,001 + 0,002 + 0,003 + 0,002 + 0,004 = 0,012$$

Загальні втрати напору в мережі визначимо, як суму втрат на кожній ділянці (величина цих втрат буде в подальшому необхідною для співставлення їх із втратами, що будуть визначені на основі еквівалентної витрати):

$$\begin{aligned}
h_{1-2} &= S_{1-2} * Q_{1-2}^2 = 0.001 * (20 + 20 + 10 + 20 + 10)^2 = 6.4 \text{ м}, \\
h_{2-3} &= S_{2-3} * Q_{2-3}^2 = 0.002 * (20 + 20 + 10 + 20)^2 = 9.8 \text{ м}, \\
h_{3-4} &= S_{3-4} * Q_{3-4}^2 = 0.003 * (20 + 20 + 10)^2 = 7.5 \text{ м}, \\
h_{4-5} &= S_{4-5} * Q_{4-5}^2 = 0.002 * (20 + 20)^2 = 3.2 \text{ м}, \\
h_{5-6} &= S_{5-6} * Q_{5-6}^2 = 0.004 * 20^2 = 1.6 \text{ м}, \\
h_{1-6} &= \sum h_{i-j} = 6.4 + 9.8 + 7.5 + 3.2 + 1.6 = 28.5 \text{ м}.
\end{aligned}$$

Тоді еквівалентна витрата буде дорівнювати

$$Q_{екв} = \sqrt{28.5/0.012} = 48.74 \text{ л / с}.$$

Втрати напору на ділянках на основі еквівалентної витрати визначаються за формулою:

$$\begin{aligned}
h'_{1-2} &= S_{1-2} * Q_{екв}^2 = 0.001 * 48.74^2 = 2.38 \text{ м}, \\
h'_{2-3} &= S_{2-3} * Q_{екв}^2 = 0.002 * 48.74^2 = 4.75 \text{ м}, \\
h'_{3-4} &= S_{3-4} * Q_{екв}^2 = 0.003 * 48.74^2 = 7.13 \text{ м}, \\
h'_{4-5} &= S_{4-5} * Q_{екв}^2 = 0.002 * 48.74^2 = 4.75 \text{ м}, \\
h'_{5-6} &= S_{5-6} * Q_{екв}^2 = 0.004 * 48.74^2 = 9.5 \text{ м}.
\end{aligned}$$

Абсолютну величину відхилення напорів в вузлах можна знайти виходячи з таких міркувань.

Вільний напір в вузлах визначається за формулою:

$$H_{i\phi} = \Pi_{i\phi} - Z_i,$$

де $\Pi_{i\phi}$ – п'єзометрична позначка в i – му вузлі;

Z_i – позначка землі в i – му вузлі.

При визначенні вільного напору за еквівалентною витратою будемо мати співвідношення:

$$H'_{i\phi} = \Pi'_{i\phi} - Z_{i,},$$

де $H'_{i\phi}$ та $\Pi'_{i\phi}$ – відповідно вільний напір і п'єзометрична позначка в i -му вузлі при використанні еквівалентної витрати.

Тоді різниця вільних напорів в i – му вузлі буде:

$$\Delta H_{i\phi} = H'_{i\phi} - H_{i\phi} = \Pi'_i - Z_i - \Pi_i + Z_i = \Pi'_i - \Pi_i.$$

П'єзометричні позначки можна визначити відносно вузла 6 мережі

$$P_i = P_6 + \sum h_{6-i}$$

i

$$P'_i = P_6 + \sum h'_{6-i},$$

де P_6 - п'єзометрична позначка у вузлі 6;

$\sum h_{6-i}$, $\sum h'_{6-i}$ - сумарні втрати напору в мережі від вузла 6 до i-го вузла, які обчислені за дійсними та еквівалентними витратами відповідно.

Тоді

$$\Delta H_{i6} = P_6 + \sum h'_{6-i} - P_6 - \sum h_{6-i} = \sum h'_{6-i} - \sum h_{6-i}.$$

Співставлення відповідних втрат напору представлено в табл. 13. При розрахунках відносного відхилення, враховуючи, що місцевість плоска, H_{i6} визначався за формулою:

$$H_{i6} = 42 + \Delta H_i.$$

Таблиця 4.2 – Співставлення вільних напорів у вузлах

Показник	Величина показника для вузлів					
	6	5	4	3	2	1
Сумарні втрати напору $\sum h_{6-i}$, м	0	1,6	4,8	12,3	22,1	28,5
Сумарні втрати напору $\sum h'_{6-i}$, м	0	9,5	14,25	21,38	26,13	28,51
Абсолютне відхилення ΔH_i , м	0	+7,9	+9,45	+9,08	+4,03	+0,01
Відносне відхилення $100 * \Delta H_i / H_{i6}$, %	0	18,1	20,2	16,7	6,3	0

Із табл. 4.2 видно, що максимальна відносна похибка в визначені вільного напору в вузлах для дев'ятиповерхових будинків досягає 20% в сторону їх завищення.

Задача №2.

Побудувати графіки функцій $Q_{\text{екв}} = f(n)$ та $\Delta P_{\text{макс}} = f(n)$ при $\sum q_i = \text{const}$ і рівномірному розподілу витрат у вигляді зосереджених витрат в вузлах по ділянці з загальним опором S_m з п'єзометричною позначкою на початку ділянки P_1 . В залежностях, для яких потрібно побудувати графіки, $Q_{\text{екв}}$ - еквівалентна витрата для мережі, n – кількість вузлів, в яких відбирається вода, $\Delta P_{\text{макс}}$ - максимальне відносне відхилення напорів в мережі, які обчислені за еквівалентною витратою, від напорів, які обчислені за реальними витратами на ділянках, $\sum q_i$ - сумарний відбір води з мережі. Чисельні величини показників прийняти згідно додатку А.

Розв'язування типової задачі

Вихідні дані задачі: $\sum q_i = 80$ л/с, $S_m = 0,012$ (для Q в л/с), $P_1 = 112,5$ м.

Для того, щоб побудувати необхідні залежності, рекомендується така методика:

- вибрати кількість варіантів відбору води з мережі за кількістю вузлових точок (чим кількість варіантів більша, тим графік буде точнішим);
- для кожного з варіантів визначити втрати напору до відповідних вузлів за еквівалентною витратою і за дійсними витратами на ділянках;
- для кожного з варіантів визначити п'єзометричні позначки в усіх вузлах;
- співставити між собою п'єзометричні позначки та визначити абсолютні відхилення напорів, які обчислені за еквівалентним опором, від напорів, що обчислені за дійсними витратами;
- знайти відносні відхилення напорів;
- за результатами останніх розрахунків побудувати необхідні графіки.

Розглянемо 5 варіантів відбору води з мережі (1, 2, 3, 4 і 5 вузлів відбору). Будемо вважати, що вода з вузлів, за винятком першого відбирається рівномірно (табл.14), довжини всіх ділянок рівні між собою.

Таблиця 4.3 – Вузлові відбори з мережі.

Кількість точок відбору	1	2	3	4	5
Номер вузла відбору	2	3	4	5	6
Витрата з кожного вузла, л/с	80	40	26,7	20	16

В **першому варіанті** вся вода відбирається з кінцевого вузла №2. Тоді для цього варіанту:

$$Q_{\text{екв.1}} = Q_d; \quad h_p = h_d; \quad S \cdot Q_{\text{екв.1}}^2 = S \cdot Q_d^2; \quad \Delta H = 0,$$

де $Q_{\text{екв.1}}$ та Q_d – еквівалентна і дійсна витрата відповідно;

h_p і h_d - розрахункова за $Q_{\text{екв}}$ і дійсна втрати напору відповідно.

$$Q_{екв} = 80 \text{ л/с}; h_p = 0,012 \cdot 80^2 = 76,8 \text{ м.}$$

В **другому варіанті** зосереджені витрати будуть тільки в кінцевому вузлі №3 і у вузлі №2. Загальні втрати напору в мережі будуть:

$$h_{1-2-3} = h_{1-2} + h_{2-3} = S_{1-2} \cdot Q_{1-2}^2 + S_{2-3} \cdot Q_{2-3}^2,$$

де h_{1-2} та h_{2-3} - втрати напору на ділянках 1-2 та 2-3 відповідно;

S_{1-2} та S_{2-3} – загальний опір ділянок 1-2 та 2-3 відповідно,

$$S_{1-2} = S_{2-3} = S_m / 2 = 0,012 / 2 = 0,006 \text{ (с/л)}^2 \text{м.}$$

Тоді

$$h_{1-2-3} = 0,006 \cdot 80^2 + 0,006 \cdot 40^2 = 48 \text{ м.}$$

Еквівалентна витрата визначається за формулою

$$Q_{екв.2} = \sqrt{h_{1-2-3} / S_m} = \sqrt{48 / 0,012} = 63,24 \text{ л / с.}$$

Втрати напору на ділянках виходячи з еквівалентної витрати будуть:

$$h_{1-2} = S_{1-2} \cdot Q_{екв.2}^2 = 0,006 \cdot 63,24^2 = 24 \text{ м,}$$

$$h_{2-3} = S_{2-3} \cdot Q_{екв.2}^2 = 0,006 \cdot 63,24^2 = 24 \text{ м.}$$

Визначення п'єзометричних позначок і їх співставлення для варіанту з двома вузлами відбору зведено в табл. 15.

Таблиця 4.4 – Співставлення п'єзометричних позначок при двох точках відбору

Номер вузла мережі	1	2	3
Номер ділянки між вузлами	-	1-2	2-3
Втрати напору на ділянках при еквівалентних витратах, м	-	24	24
П'єзометричні позначок в вузлах при еквівалентних витратах, м	112,5	88,5	64,5
Втрати напору на ділянках при реальних витратах, м	-	38,4	9,6
П'єзометричні позначок в вузлах при реальних витратах, м	112,5	74,1	64,5

Абсолютне відхилення, %	0	+ 14,4	0
Відносне відхилення, %	0	+ 19,3	0

В **третьому варіанті** зосереджені витрати будуть в вузлах №2, №3 та №4. Загальні втрати напору на трьох ділянках мережі будуть

$$h_{1-2-3-4} = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-4} = S_{1-2} * Q_{1-2}^2 + S_{2-3} * Q_{2-3}^2 + S_{3-4} * Q_{3-4}^2 .$$

При однакових довжинах ділянок

$$S_{1-2} = S_{2-3} = S_{3-4} = S_M / 3 = 0,012 / 3 = 0,04 (с / л)^2 м .$$

Тоді

$$h_{1-2-3-4} = 0.004 * 80^2 + 0.004 * 53.4^2 + 0.004 * 26.7^2 = 39.86 м.$$

При таких втратах напору еквівалента витрата буде

$$Q_{екв.3} = \sqrt{h_{1-2-3-4} / S_M} = \sqrt{39,86 / 0.012} = 57,63 л / с.$$

Втрати напору на кожній з трьох ділянок дорівнюють:

$$h_{1-2} = h_{2-3} = h_{3-4} = h_{1-2-3-4} / 3 = 39.86 / 3 = 13.29 м.$$

Визначення п'єзометричних позначок та їх співставлення для третього варіанту зведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Співставлення п'єзометричних позначок при трьох точках відбору

Номер вузла мережі	1	2	3	4
Номер ділянки між вузлами	-	1-2	2-3	3-4
Втрати напору на ділянках при еквівалентних витратах, м	-	13,29	13,29	13,29
П'єзометричні позначок в вузлах при еквівалентних витратах, м	112,5	99,21	85,92	72,63
Втрати напору на ділянках при реальних витратах, м	-	25,6	11,41	2,85
П'єзометричні позначок в вузлах при реальних витратах, м	112,5	86,9	75,49	72,64
Абсолютне відхилення, %	0	+ 12,31	+ 10,43	- 0,01

Відносне відхилення, %	0	+ 14,2	+ 13,8	- 0,01
------------------------	---	--------	--------	--------

В **четвертому варіанті** зосереджені витрати будуть в вузлах №2, №3, №4 та №5. Загальні втрати напору на чотирьох ділянках мережі будуть

$$h_{1-5} = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-4} + h_{4-5} = \sum_1^4 S_{i-j} * Q_{i-j}^2$$

Загальний опір кожної із ділянок дорівнює

$$S_{1-2} = S_{2-3} = S_{3-4} = S_{4-5} = S_M / 4 = 0,012 / 4 = 0,003 (с / л)^2 \cdot м$$

Тоді

$$h_{1-5} = 0,003 * 80^2 + 0,003 * 60^2 + 0,003 * 40^2 + 0,003 * 20^2 = 36 м.$$

Еквівалентна витрата при чотирьох вузлах відбору

$$Q_{екв.4} = \sqrt{h_{1-5} / S_M} = \sqrt{36 / 0,012} = 54,77 л / с.$$

Втрати напору на кожній з чотирьох ділянок будуть дорівнювати

$$h_{1-2} = h_{2-3} = h_{3-4} = h_{4-5} = h_{1-5} / 4 = 36 / 4 = 9 м.$$

Визначення п'єзометричних позначок та їх співставлення для четвертого варіанту зведено у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Співставлення п'єзометричних позначок при чотирьох точках відбору

Номер вузла мережі	1	2	3	4	5
Номер ділянки між вузлами	-	1-2	2-3	3-4	4-5
Втрати напору на ділянках при еквівалентних витратах, м	-	9	9	9	9
П'єзометричні позначки в вузлах при еквівалентних витратах, м	112,5	103,5	94,5	85,5	76,5
Втрати напору на ділянках при реальних витратах, м	-	19,2	10,8	4,8	1,2
П'єзометричні позначки в вузлах при реальних витратах, м	112,5	93,3	82,5	77,7	76,5
Абсолютне відхилення, %	0	+10,2	+12,0	+7,8	0

Відносне відхилення, %	0	-10,9	+14,5	+10,0	0
------------------------	---	-------	-------	-------	---

В п'ятому варіанті зосереджені витрати будуть в вузлах №2, №3, №4, №5 та №6. Загальні втрати напору на п'яти ділянках мережі будуть

$$h_{1-6} = h_{1-2} + h_{2-3} + h_{3-4} + h_{4-5} + h_{5-6} = \sum_1^5 S_{i-j} * Q_{i-j}^2$$

Загальний опір кожної із ділянок дорівнює:

$$S_{1-2} = S_{2-3} = S_{3-4} = S_{4-5} = S_{5-6} = S_M / 5 = 0,012 / 5 = 0,0024 (с / л)^2 м$$

Тоді

$$h_{1-6} = 0,0024 * 80^2 + 0,0024 * (80 - 16)^2 + 0,0024 * (80 - 32)^2 + 0,0024 * (80 - 48)^2 + 0,0024 * 16^2 = 15,36 + 9,83 + 5,53 + 2,46 + 0,61 = 33,79 м.$$

Еквівалентна витрата при п'яти вузлах відбору:

$$Q_{екв.5} = \sqrt{h_{1-6} / S_M} = \sqrt{33,79 / 0,012} = 53,06 л / с.$$

Втрати напору на кожній з п'яти ділянок будуть дорівнювати

$$h_{1-2} = h_{2-3} = h_{3-4} = h_{4-5} = h_{5-6} = h_{1-6} / 5 = 33,79 / 5 = 6,76 м.$$

Визначення п'єзометричних позначок та їх співставлення для п'ятого варіанту зведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Співставлення п'єзометричних позначок при п'яти точках відбору

Номер вузла мережі	1	2	3	4	5	6
Номер ділянки між вузлами	-	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
Втрати напору на ділянках при еквівалентних витратах, м	-	6,76	6,76	6,76	6,76	6,76
П'єзометричні позначки в вузлах при еквівалентних витратах, м	112,5	105,74	98,98	92,22	85,46	78,7
Втрати напору на ділянках при реальних витратах, м	-	15,36	9,83	5,53	2,46	0,61
П'єзометричні позначки в вузлах при реальних витратах, м	112,5	97,14	87,31	81,78	79,32	78,71
Абсолютне відхилення, %	0	+8,6	+11,67	+10,44	+6,14	-0,01

Відносне відхилення, %	0	+8,8	+13,4	+12,8	+7,7	-0,01
------------------------	---	------	-------	-------	------	-------

Аналізуючи дані таблиць 4.5 – 4.7, бачимо, що використання еквівалентних витрат для визначення втрат напору на окремих ділянках дає завищені результати. При цьому максимальна похибка буде приблизно на середині мережі із зменшенням її до кінцевих вузлів, в яких відхилення становить 0%. За даними максимальних відносних відхилень $\Delta\P_{\text{макс}}$ з кожної таблиці будується графік, який наведено на рис.8, а на рис.9. наведено графік залежності величини еквівалентної витрати від того, як розподіляється відбір води з мережі.

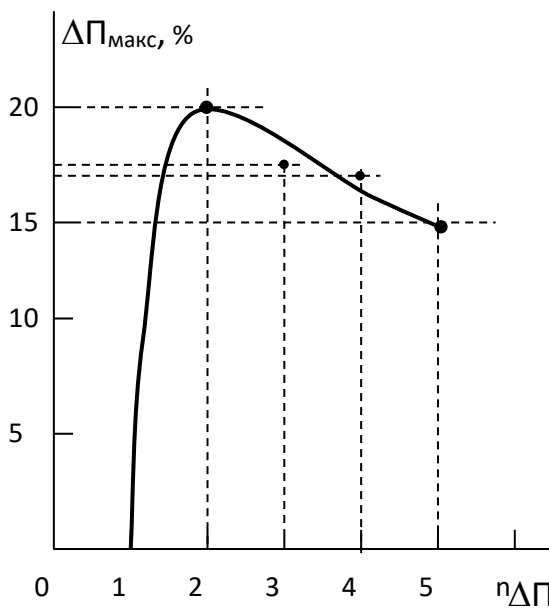


Рисунок 4.1 – Графік $\Delta\P_{\text{макс}}=f(n)$

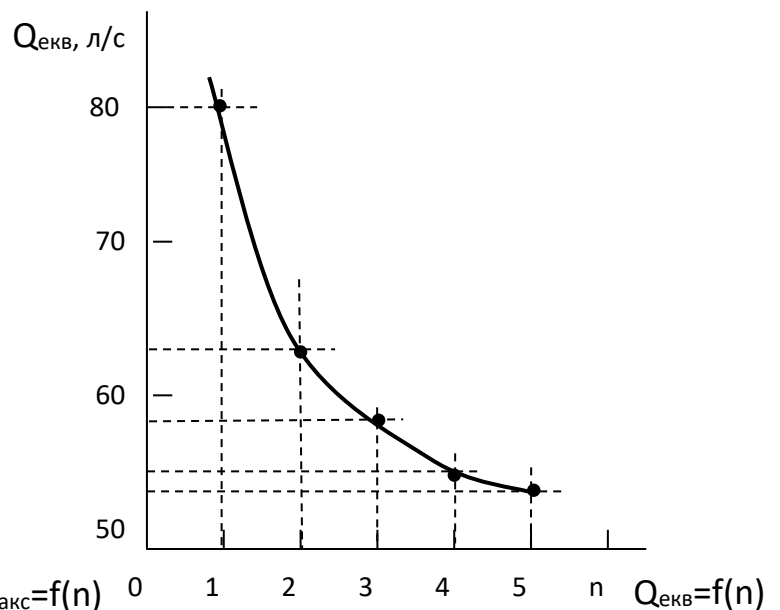


Рисунок 4.2 – Графік $Q_{\text{екв}}=f(n)$

Із графіків (рис. 4.1 та рис.4.2) видно, що із збільшенням кількості вузлів відбору при рівномірному їх розподілі, зменшується величина еквівалентної витрати і збільшується точність розрахунків.

Практичне заняття 5. Елементарні комбінації в гідравлічних комплексах і їх характеристики

Запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу, який вивчається:

- З яких елементарних комбінацій складаються гідравлічні комплекси?
- В чому особливість першої елементарної комбінації і де вона частіше всього використовується?
- В чому особливість другої елементарної комбінації і яка її область використання?
- В чому особливість третьої елементарної комбінації і яка область використання?

Задача №1. Визначити, в яких межах буде змінюватися подача насоса, який забирає воду з резервуару глибиною $H_{\text{рез}}$ і подає її в резервуар такої ж глибини, якщо

вісь насоса знаходиться на рівні максимальної позначки води в нижньому резервуарі, а відстань від вісі насоса до низу верхнього резервуару H_7 . Напірно-витратна характеристика насоса описується залежністю:

$$H = 84,49 - 0,00098 Q^2,$$

опір всмоктувальної лінії $S_{вс}$, а напірної лінії – S_n . Чисельні значення прийняти згідно з додатком А.

Розв'язування типової задачі

Дано: $H_{рез} = 4\text{м}$, $H_7 = 50\text{м}$, $S_{вс} = 10^{-4}$ (для витрат в л/с),

$S_n = 4 \times 10^{-4}$ (для витрат в л/с).

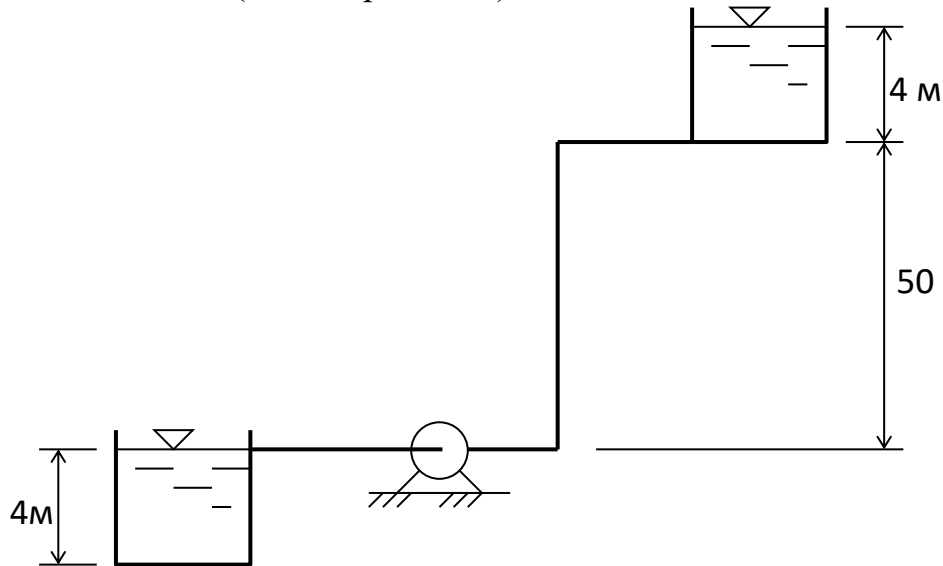


Схема елементарної комбінації приведена на рис.2.

Рисунок 5.1 – Схема першої комбінації елементів в комплексах

Необхідний повний напір насоса дорівнює

$$H = H_{Г.В.} + H_{Г.Н.} + S_{вс}Q^2 + S_nQ^2 = H_{Г.П.} + (S_{вс} + S_n)Q^2.$$

Найбільша витрата буде подаватись насосом, коли геометрична висота підйому буде мінімальною, тобто коли $H_{Г.П.} = 50\text{м}$, а найменша витрата буде при найбільшій геометричній висоті підйому, тобто

$$H_{Г.П.} = 50 + 4 + 4 = 58 \text{ м}.$$

Тоді характеристика елементарної комбінації при максимальній подачі може бути описана системою рівнянь

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 50 + (0,0001 + 0,0004)Q^2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 50 + 0,0005 Q^2. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, одержимо

$$\begin{aligned}0 &= 34,49 - 0,00148 Q^2, \\Q^2 &= 34,49 / 0,00148 = 23304, \\Q_{\max} &= 152,7 \text{ л/с}.\end{aligned}$$

При мінімальній подачі характеристика елементарної комбінації описується системою рівнянь

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 58 + 0,0005 Q^2. \end{cases}$$

Віднявши з першого рівняння друге отримаємо

$$0 = 26,49 - 0,00148 Q^2.$$

Звідки

$$\begin{aligned}Q^2 &= 26,49 / 0,00148 = 17899, \\Q_{\max} &= 133,8 \text{ л/с}.\end{aligned}$$

Таким чином, при перекачці води з одного резервуара в інший для умов задачі подача насосу буде змінюватися в межах 133,8...152,7 л/с.

Задача №2. Розв'язати попередню задачу за умовою, що на напірній лінії є два фіксованих відбора: перший з витратою Q_7 на відстані від насосної станції, яка еквівалента повному опоріві S_1 , другий з витратою Q_8 на відстані від першого відбору, еквівалентній повному опоріві S_2 . Чисельні значення прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Припустимо, що $Q_7=20$ л/с, $S_1=2 \times 10^{-4}$ (для витрати в л/с), $Q_8=30$ л/с, а $S_1=1 \times 10^{-4}$ (для витрати в л/с).

По аналогії з попередньою задачею при максимальній подачі характеристика елементарної комбінації буде описуватися системою рівнянь

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 50 + S_{\text{вс}} Q^2 + S_1 Q^2 + S_2 (Q - 20)^2 + (S_H - S_1 - S_2)(Q - 20 - 30)^2. \end{cases}$$

Підставивши величини опорів в систему, отримаємо

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 50 + 0,0001 Q^2 + 0,0002 Q^2 + 0,0001(Q^2 - 40Q + 400) + 0,0001(Q^2 - 100Q + 2500). \end{cases}$$

Спрощуючи друге рівняння, одержимо

$$\begin{aligned}H &= 50 + (0,0001 + 0,0002 + 0,0001 + 0,0001)Q^2 - (0,004 + 0,01)Q + 0,04 + 0,25, \\H &= 50 + 0,0005Q^2 - 0,014Q + 0,29.\end{aligned}$$

Тоді система, що описує елементарну комбінацію, буде мати вигляд

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 50,29 - 0,014 Q + 0,0005 Q^2. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо

$$0,00148Q^2 - 0,014Q - 34,2 = 0, \\ Q = \frac{9,46}{2} \pm \sqrt{(9,46/2)^2 + 23108} = 4,73 \pm \sqrt{22,37 + 23108} = 4,73 \pm 152,01.$$

Фізичний зміст має тільки позитивний результат.

Тоді при максимальній подачі в систему буде надходити

$$Q_{\text{макс}} = 4,73 + 152,09 = 156,82 \text{ л/с.}$$

При мінімальній подачі характеристика системи описується такою системою рівнянь

$$\begin{cases} H = 84,49 - 0,00098 Q^2, \\ H = 58,29 - 0,014 Q + 0,0005 Q^2. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо

$$0,00148Q^2 - 0,014Q - 26,2 = 0, \\ Q = 4,73 \pm \sqrt{4,73^2 + 17703} = 4,73 \pm \sqrt{17725} = 4,73 \pm 133,13.$$

Мінімальна подача насоса буде

$$Q_{\text{мін}} = 4,73 + 133,13 = 137,86 \text{ л/с.}$$

Задача № 3. Визначити подачу і напір кожної з двох насосних станцій (рис.3), які працюють послідовно і на яких встановлено однакові насоси з напірно-витратною характеристикою, що описується рівнянням

$$H = 84,49 - 0,00098 Q^2,$$

якщо відбори в вузлах №1 і №2 складають відповідно Q_7 і Q_8 , а загальні опори окремих ділянок однакові і дорівнюють S_3 . Перевищення рівня води в резервуарі над віссю насосів насосної станції №2 - ΔZ_1 , перевищення вісі насосів насосної станції №2 над віссю насосів насосної станції №1 - ΔZ_2 . Вісь насосів насосної станції №1 знаходиться на позначці рівня води в джерелі. Втратами у всмоктувальній лінії насосної станції №1 знехтувати. Чисельні значення вихідних даних прийняти згідно з додатком А.

$$H_I = 84,49 - 0,00098 Q_I^2 ,$$

$$H_{II} = 84,49 - 0,00098 (Q_I - Q_7)^2 .$$

Підставивши всі числові значення в загальний вираз, який описує роботу елементарної схеми, одержимо:

$$\begin{aligned} & 84,49 - 0,00098 Q_I^2 - 2 \times 0,0002 Q_I^2 + 2 \times 0,0002 \times 20 Q_I + 0,0002 \times 20^2 = \\ & = 50 + 60 + 2 \times 0,0002 Q_I^2 - 4 \times 0,0002 \times 20 Q_I - 2 \times 0,0002 \times 30 Q_I + \\ & + 2 \times 0,0002 \times 20^2 + 2 \times 0,0002 \times 20 \times 30 + 0,002 \times 30^2 - 84,49 + 0,00098 (Q_I - 20)^2 ; \\ & 84,49 - 0,00098 Q_I^2 - 0,0004 Q_I^2 + 0,008 Q_I + 0,08 = \\ & = 110 + 0,0004 Q_I^2 - 0,016 Q_I - 0,012 Q_I + 0,16 + 0,24 + 0,18 - \\ & - 84,49 + 0,00098 Q_I^2 - 2 \times 0,00098 \times 20 Q_I + 400 \times 0,00098; \\ & 58,09 + 0,0752 Q_I - 0,00276 Q_I^2 = 0; \\ & Q_I^2 - 27,25 Q_I - 21047 = 0; \\ & Q_I = 27,25/2 \pm \sqrt{(27,25/2)^2 + 21047} = 13,63 \pm \sqrt{185,78 + 21047} = \\ & = 13,65 \pm \sqrt{21233} = 13,65 \pm 145,71; \end{aligned}$$

$$Q_I = 159,36 \text{ л/с} .$$

Напір насосів насосної станції №1 буде

$$H_I = 84,49 - 0,00098 \times 159,36^2 = 84,49 - 24,89 = 59,6 \text{ м.}$$

Подача насосів насосної станції №2 дорівнює

$$Q_{II} = Q_I - Q_7 = 159,36 - 20 = 139,36 \text{ л/с,}$$

а напір

$$H_{II} = 84,49 - 0,00098 \times 139,36^2 = 84,49 - 19,03 = 65,46 \text{ м.}$$

Практичне заняття 6. Гідравлічні характеристики і перевіркові розрахунки систем водовідведення

Запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу, який вивчається:

- Чим відрізняється напірно-витратні характеристики насосів для перекачки стоків від насосів для перекачки чистої води?
- В чому особливість гідравлічних характеристик напірних трубопроводів систем водовідведення в порівнянні з характеристиками напірних трубопроводів систем водопостачання?
- Чим характеризуються ємності-регулятори в системах водовідведення?
- Яка характеристика самопливних ліній в системах водовідведення?
- Для чого виконуються перевірочні розрахунки комплексу водовідведення?
- Головні задачі перевірочних розрахунків комплексу водовідведення.

- Як забезпечується збільшення пропускної можливості напірних елементів систем водовідведення?

Задача № 1. Описати аналітично напірно-витратну характеристику Q - H каналізаційного насосу в межах робочої області кривою другого порядку і прямою лінією, якщо вона описується даними: $Q_{1к}$ - $H_{1к}$, $Q_{2к}$ - $H_{2к}$, $Q_{3к}$ - $H_{3к}$, $Q_{4к}$ - $H_{4к}$, $Q_{5к}$ - $H_{5к}$, числові значення яких наведено в додатку А. Оцінити відхилення апроксимації від реальної характеристики. Чисельні значення $Q_{ік}$ і $H_{ік}$ прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Нехай напірно-витратна характеристика насосу описується залежністю (табл.11).

Таблиця 6.1 – Напірно-витратна характеристика насосу

Напір $H_{ік}$, м	52	50	48	46	44
Подача $Q_{ік}$, м ³ /с	25	30	35	42	47

Спочатку опишемо напірно-витратну характеристику рівнянням кривої другого порядку вигляду:

$$H = a_0 + a_1 Q^2.$$

Для крайніх меж робочої області система рівнянь буде:

$$\begin{cases} 52 = a_0 + a_1 \times 25^2, \\ 44 = a_0 + a_1 \times 47^2. \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему, отримаємо

$$\begin{cases} 52 = a_0 + 625a_1, \\ 44 = a_0 + 2209a_1. \end{cases}$$

Якщо від першого рівняння відняти друге, то

$$8 = -1584 a_1 .$$

Звідки $a_1 = -0,00505$.

Підставивши величину коефіцієнта a_1 в перше рівняння, отримаємо:

$$\begin{aligned} 52 &= a_0 - 0,00505 \times 625 , \\ a_0 &= 52 + 3,16 = 55,16 . \end{aligned}$$

Тоді напірно-витратна характеристика буде описуватись рівнянням

$$H = 55,16 - 0,00505 Q^2.$$

Знайдемо відхилення розрахункових величин напору від напору, який дається в вихідних даних. Для цього складаємо табл.12.

Для одержання розрахункових напорів, які необхідні для співставлення, задаємось подачею насоса з табл.11 і підставляємо її в рівняння напірно-витратної характеристики.

Таблиця 6.2 – Співставлення розрахункових і вихідних напорів при описуванні характеристики Q-H кривою другого порядку

Параметр, що аналізується	Чисельна величина параметру				
Напір по графічній характеристиці насоса, м	52	50	48	46	44
Напір, який розраховано по кривій $H=f(Q)$, м	52	50,6	49	46,2	44
Абсолютне відхилення, %	0	-0,6	-1	-0,2	0
Відносне відхилення, %	0	-1,2	-2,08	-0,4	0

Тепер отримаємо характеристику лінійною залежністю вигляду:

$$H = a_0 - a_1 Q.$$

Для меж робочого діапазону система рівнянь буде:

$$\begin{cases} 52 = a_0 - a_1 \times 25, \\ 44 = a_0 - a_1 \times 47. \end{cases}$$

Розв'язуючи ці рівняння, будемо мати:

$$\begin{aligned} 8 &= 22 a_1, & a_1 &= 0,3636, \\ a_0 &= 52 + 25 \times 0,3636 = 52 + 9,09 = 61,09. \end{aligned}$$

Тоді загальний вигляд рівняння буде:

$$H = 61,09 - 0,3636 Q.$$

Розрахуємо відхилення величин напорів, які визначаються за графічною характеристикою, від напорів, що обчислюються за останньою формулою. Для цього складемо табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Співставлення розрахункових і вихідних напорів при описуванні характеристики Q-H лінійною залежністю

Параметр, що аналізується	Чисельна величина параметру				
Напір по графічній характеристиці насоса, м	52	50	48	46	44
Напір, який розраховано по кривій $H=f(Q)$, м	52	50,2	48,4	45,8	44

Абсолютне відхилення, %	0	-0,2	-0,4	+0,2	0
Відносне відхилення, %	0	-0,4	-0,8	+0,4	0

З таблиць 6.2 і 6.3 видно, що аналітичне описання графічної напірно-витратної характеристики забезпечує достатню для практики точність. В межах області характеристики каналізаційних відцентрових насосів, яка рекомендується для використання, напірно-витратну характеристику доцільно описувати лінійною залежністю.

Задача №2. Визначити, як зміниться повний напір пневматичної установки, яка забезпечує підймання стоків на висоту $H_{\text{бак}}$ при витраті q_{15} і довжині напірного трубопроводу l_3 і питомим опором $S_0 = 3686 \times 10^{-6}$ (для витрат в л/с), якщо витрата зросте в φ разів. Чисельні значення вихідних величин прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Дано: $q_{15} = 3$ л/с, $H_{\text{бак}} = 5$ м, $l_3 = 10$ м, $\varphi = 1,5$.

Визначимо повний напір установки до збільшення її подачі:

$$H = H_{\Gamma} + S q_{15}^2 = H_{\Gamma} + S_0 l_3 q_{15}^2,$$

$$H = 5 + 3686 \times 10^{-6} \times 10 \times 3^2 = 5,33 \text{ м}.$$

При збільшенні подачі в φ разів повний напір установки зросте до величини:

$$H_1 = H_{\Gamma} + S \varphi^2 q_{15}^2 = 5 + 3686 \times 10^{-6} \times 10 \times 1,5^2 \times 3^2 = 5,75 \text{ м}.$$

Таким чином, при збільшенні витрати в 1,5 рази повний напір повинен зрости в 1,08 разів, щоб компенсувати збільшення витрат напору в 2,25 разів.

Задача №3. Побудувати графік залежності довжини l додаткового колектора, який прокладається паралельно до тих колекторів, що вже існують, з метою зменшення їх загального опору, від відносного збільшення витрати в напірних трубопроводах φ_i . В вихідному положенні напірні трубопроводи виконано у вигляді n_0 паралельних ліній довжиною L такого ж діаметра, як і існуючі колектори.

Розв'язування типової задачі

Аналітична залежність $l_i = f(\varphi_i)$ має вигляд:

$$l_i = \frac{1 - \varphi_i^2}{\varphi_i^2} \times \frac{n_1^2}{n_0^2 - n_1^2} L,$$

де φ_i – коефіцієнт збільшення витрати,

n_1 і n_0 – кількість напірних колекторів на різних ділянках (відповідно там де є підсилюючий колектор і де його немає).

Якщо в вихідному положенні було n_0 напірних колекторів довжиною L , то $n_0 + 1$ паралельний колектор повинен бути такої ж довжини при необхідності збільшення

загальної витрати в n_0 рази, коли кожний колектор буде подавати по

$\frac{1}{n_1}$ від загальної витрати.

Розглянемо випадок, коли $n_0=2$, а $L=100\text{м}$.

В цьому випадку $n_0=2$ і $n_1=3$. Тоді

$$\frac{n_1^2}{n_0^2 - n_1^2} = \frac{3^2}{2^2 - 3^2} = -\frac{9}{5} = -1,8.$$

Складаємо допоміжну таблицю 14. Для цього задаємось величинами φ_i в межах від $\varphi_i=1,1$ до

$$\varphi_1 = (n_0 + 1) / n_0 = (2 + 1) / 2 = 1,5.$$

і визначаємо необхідну довжину підсилюючого колектора. При цьому, щоб одержати необхідну кількість точок для побудови графіка необхідно діапазон зміни φ_i від $\varphi_{i.\min}$ до $\varphi_{i.\max}$ розділити не менше, ніж на 3 відрізка.

Таблиця 6.4 – Необхідна довжина підсилюючого колектора l_i при різному φ_i

Параметр, який визначається	Величина параметра при φ_i				
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$(1 - \varphi_i^2) / \varphi_i^2$	-0,17	-0,30	-0,41	-0,49	-0,56
$l_i, \text{м}$	31	54	74	88	100

Графічна залежність $l_i = f(\varphi_i)$ буде мати вигляд:

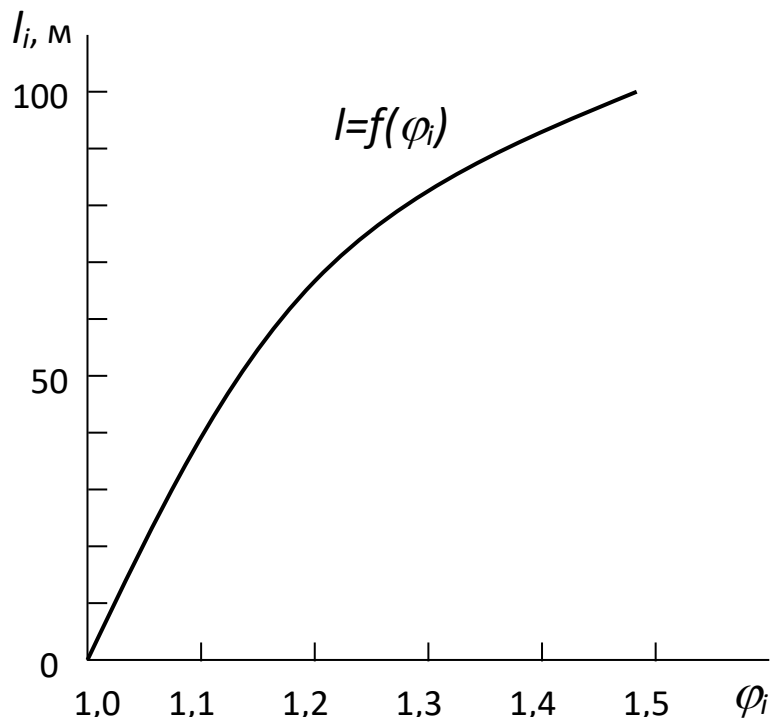
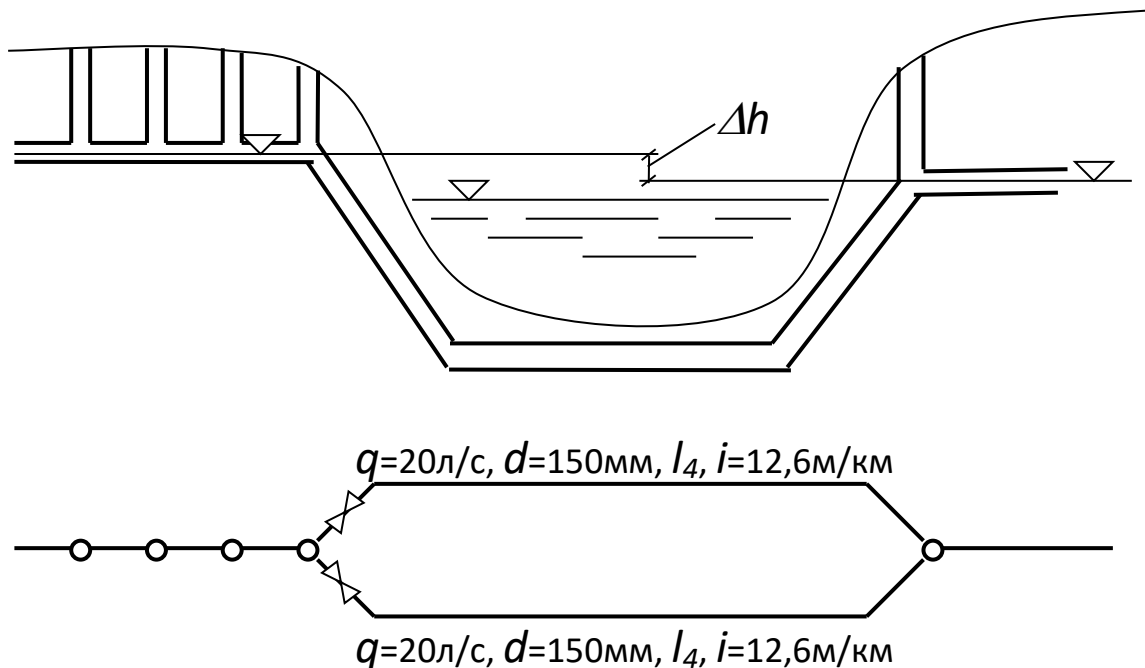


Рисунок 6.1– Графік функції $l_i = f(\varphi_i)$.

Задача №4. Як зміниться режим роботи ділянок переходу через річку колектора довжиною l_4 і $d=150\text{мм}$, схема якого приведена на рис.16, якщо витрата стоків збільшиться в φ_2 разів.

Три ділянки самопливного колектора $d=300\text{мм}$ з верхової сторони дюкера характеризується такими показниками: ухил труб $i=0,004$, загальна довжина $l=150\text{м}$, витрата 40л/с , швидкість руху стоків $v=0,9\text{м/с}$, наповнення $h/d=0,6$. Необхідні



чисельні величини прийняти по додатку А.

Рисунок 6.2 – Схема переходу через річку

Розв'язування типової задачі

Дано: $l_4=150\text{м}$, $\varphi_2=1,3$.

Втрати напору в дюкері в вихідному стані дорівнюють:

$$\Delta h_1 = h_l + h_m = il_4 + \sum \zeta_i \frac{v_g^2}{2g},$$

де h_l і h_m – втрати напору по довжині і на місцеві опори відповідно,

ζ_i - коефіцієнти місцевого опору в дюкері.

$$\Delta h_1 = 12,6 \times 0,15 + (\zeta_{вх.} + \zeta_{зас.} + m \zeta_{відв.} + \zeta_{вих.}) \frac{v_g^2}{2g},$$

де $\zeta_{вх.}$, $\zeta_{зас.}$, $\zeta_{відв.}$, $\zeta_{вих.}$ – коефіцієнт місцевого опору на вході в трубу, в засувці, в відводі, на вихід з труби відповідно,

m - кількість відводів, $m=2$;

v_g - швидкість руху стоків в дюкері.

$$\Delta h = 1,89 + (0,5 + 0,11 + 2 \times 0,15 + 1) \frac{1,13^2}{2 \times 9,81} = 2,01 \text{ м}$$

При збільшенні витрати в $\varphi_2=1,3$ рази втрати напору зростуть в $1,3^2=1,69$ рази і складуть:

$$\Delta h_2 = 1,69 \Delta h_1 = 3,38 \text{ м},$$

що на

$$\Delta h_3 = \Delta h_2 - \Delta h_1 = 3,38 - 2,01 = 1,37 \text{ м}$$

більше вихідних втрат напору.

Перепад позначок рівнів stokів між крайніми колодзями з верхової і низової сторін переходу складає:

$$\Delta h_g = i_g \times l_g,$$

де i_g – ухил верхової лінії,

l_g - довжина верхової ділянки.

$$\Delta h_g = 0,004 \times 150 = 0,6 \text{ м}.$$

Якщо не вжити ніяких заходів, то при збільшенні витрат вся верхня ділянка, а також ряд прилеглих ділянок будуть підтоплені, тому що

$$\Delta h_3 > \Delta h_g.$$

Для зменшення втрат напору в переході можна прокласти додаткову лінію дюкеру, що приведе до перерозподілу витрат stokів в лініях. При загальній витраті:

$$40 \times 1,3 = 52 \text{ л/с}$$

витрата в кожній лінії буде:

$$52 / 3 = 17,33 \text{ л/с}.$$

В цьому випадку швидкість руху stokів в лініях дюкеру буде:

$$v_1 = Q / (0,785 d^2) = 0,01733 / (0,785 \times 0,15^2) = 0,98 \text{ м/с},$$

а питомі втрати напору $i'_0=9,6 \text{ м/км}$ [2]. Тоді втрати напору в дюкері будуть дорівнювати:

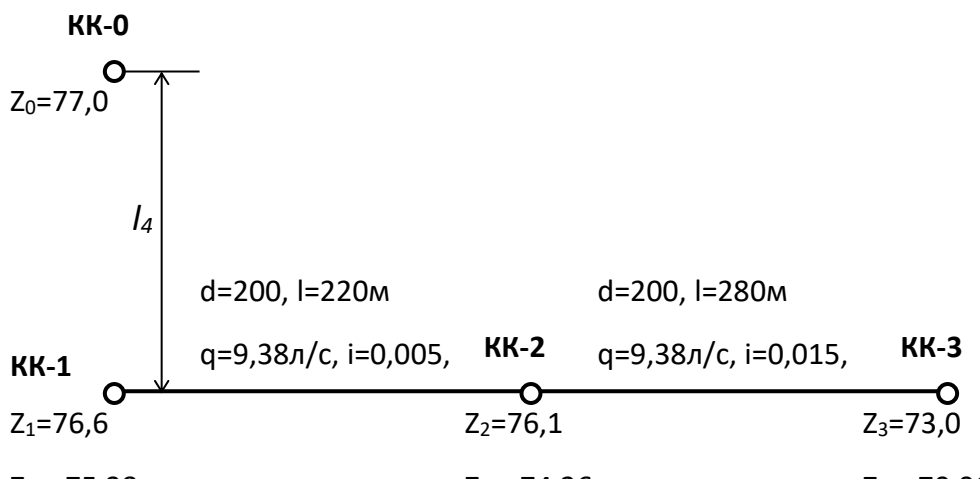
$$\Delta h'_1 = i'_0 l + \sum \zeta_i \frac{v_1^2}{2g} = 9,6 \times 0,15 + 1,91 \frac{0,98^2}{2 \times 9,81} = 1,53 \text{ м}.$$

Таким чином, в цьому випадку система буде працездатною, але можливе замулювання окремих ліній. З цим можна боротися за допомогою промивки, виключаючи періодично на період промивки одну з ліній дюкеру.

Задача №5. З'ясувати, як можливо підключити новий дім до існуючої мережі, схема якої приведена на рис. 17. Витрата стоків від нового дому q_{10} . Відстань від каналізаційного колодязя, який необхідно підключити до існуючої мережі, l_4 . Мінімальне допустиме заглиблення цього колодязя $H_0=0,8\text{м}$. Чисельні величини прийняти по додатку А. Лінійні колодязі на ділянках КК-1÷КК-2 і КК-2÷КК-3 не показані.

Розв'язування типової задачі

Нехай $l_4=150\text{м}$, а $q_{10}=7,5\text{ л/с}$.



Для того, щоб можна було підключити новий дім до існуючої мережі, вона повинна, по-перше, пропустити збільшену витрату, по-друге, дозволити забезпечити в колодязі КК-0 допустиме мінімальне заглиблення при необхідному перепаді позначок на ділянці.

Перевіримо, чи пропусне ділянка КК-1-КК-2 збільшену витрату, тобто витрату:

$$q_{заг.} = q_{10.} + q_{1-2} = 9,38 + 7,5 = 16,88 \text{ л/с} .$$

Користуючись таблицями Лукіних [3], визначаємо, що при витраті 16,88л/с в трубі $d=200\text{мм}$ і ухилі $i=0,005$ наповнення $h/d=0,66$, а швидкість $v=0,765\text{м/с}$, тобто швидкість буде перевищувати мінімально допустиму швидкість ($v_{\min}=0,7\text{м/с}$), але наповнення буде більшим нормативного ($h/d=0,6$).

Перевіримо ділянку КК-2-КК-3 на пропуск витрати 16,88л/с. Згідно з таблицями Лукіних [3] при збільшеній витраті в трубі $d=200\text{мм}$ з ухилом $i=0,015$ буде наповнення $h/d=0,47$, а швидкість $v=1,17\text{м/с}$, що знаходиться в рекомендуємому режимі.

Таким чином, при підключенні нової ділянки до колодязя КК-2 режим роботи слідує за ним ділянок не погіршиться.

Визначимо, при якому мінімальному ухилі лінії КК-0-КК-2 в ній забезпечується потрібний режим. При $d=150\text{мм}$, витраті 7,5л/с і ухилі $i=0,007$ знаходимо, що $h/d=0,6$, а $v=0,72\text{м/с}$ [3].

Перевіримо можливість підключення колодязя КК-0 до колодязя КК-2. Довжина найкоротшої лінії між ними буде:

$$L = \sqrt{l_4^2 + l_{1-2}^2} = \sqrt{150^2 + 220^2} = 266 \text{ м.}$$

Тоді необхідний перепад позначок лотків при мінімальному ухилі повинен бути:

$$\Delta h = i L = 0,007 \times 266 = 1,862 \text{ м.}$$

При підключенні колодязя КК-0 до колодязя КК-2 без перепаду позначки лотка колодязя КК-0 при мінімальному ухилі повинна бути :

$$Z_{ЛО} = Z_{Л2} + \Delta h = 74,26 + 1,862 = 76,122 \text{ м.}$$

Розрахункове заглиблення колодязя КК-0 буде:

$$H'_0 = Z_0 - Z_{ЛО} = 77 - 76,122 = 0,878 \text{ м.}$$

Перевіримо можливість підключення нового дому до колодязя КК-1. В цьому випадку необхідний перепад позначок буде:

$$\Delta h' = i l_4 = 0,007 \times 150 = 1,05 \text{ м,}$$

а позначка лотка

$$Z'_{ЛО} = Z_{Л2} + \Delta h' = 75,37 + 1,05 = 76,42 \text{ м,}$$

а початкове заглиблення:

$$H''_0 = 77 - 76,42 = 0,58 \text{ м,}$$

що менше мінімально допустимого заглиблення.

Таким чином, новий дім може бути підключено до колодязя КК-2 із збереженням всіх нормативних вимог.

Практичне заняття 7. Перевіркові розрахунки мереж транспортування води та регулювальних місткостей

Запитання для самоконтролю засвоєння матеріалу, який вивчається

- В чому особливість перевірочних розрахунків водопровідних мереж?
- Які групи рівнянь можна скласти для розв'язування задач перевірочних розрахунків?
- Які групи рівнянь необхідно використовувати при розрахунках розгалужених мереж з одним водоживлювачем?

- Коли для визначення витрат кожної з ділянок розгалуженої мережі достатньо рівнянь тільки першої групи?

Задача №1. Перевірити працездатність схеми водопостачання, яка зображена на рис.6. Напірно-витратна характеристика насосної станції описується виразом

$$H = 45,06 - 0,00287 Q^2,$$

а висота башти H_B . Чисельні величини витрат і загальних опорів окремих ділянок прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Нехай мережа характеризується такими даними:

$q_1=25\text{л/с}$, $q_2=20\text{л/с}$, $q_3=15\text{л/с}$, $S_{H-1}=0,0035$ (при Q в л/с), $S_{1-2}=0,003$, $S_{2-3}=0,0025$, $S_{3-Б}=0,001$, $H_B = 35$ м .

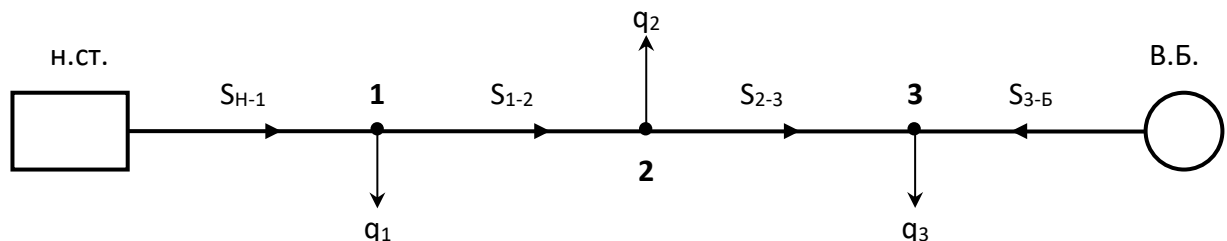


Рисунок 7.1 – Схема мережі

Наведена схема водопровідної мережі буде працездатною в тому випадку, коли в ній будуть виконуватися закони гідравліки. При напрямках руху води, які вказані на рис.6, повинна виконуватись умова

$$H - S_{H-1} q_{H-1}^2 - S_{1-2} q_{1-2}^2 - S_{2-3} q_{2-3}^2 = H_B - S_{3-Б} q_{3-Б}^2 .$$

Це рівняння являється рівнянням зовнішньої ув'язки (четвертої групи). Витрати окремих ділянок мережі можна визначити через подачу насосної станції і вузлові відбори:

$$\begin{aligned} q_{H-1} &= Q_H, \quad q_{1-2} = Q_H - q_1, & q_{2-3} &= Q_H - q_1 - q_2, \\ q_{3-Б} &= Q_H - q_1 - q_2 - q_3, \\ \text{де } Q_H &\text{— подача насосної станції;} \\ q_1, q_2, q_3 &\text{— вузлові відбори.} \end{aligned}$$

Використавши ці співвідношення і підставивши в перше рівняння числові величини, отримаємо

$$45,06 - 0,00287 Q_H^2 - 0,0035 Q_H^2 - 0,003 (Q_H - 25)^2 - 0,0025 (Q_H - 25 - 20)^2 - 35 + 0,001 (Q_H - 25 - 20 - 15)^2 = 0 .$$

Розв'язуючи це рівняння, одержано

$$\begin{aligned}
 &10,06 - 0,00637Q_H^2 - 0,003(Q_H^2 - 50Q_H + 625) - 0,0025(Q_H^2 - 90Q_H + 2025) + \\
 &+ 0,001(Q_H^2 - 120Q_H + 3600) = 0; \\
 &10,06 - 0,00637Q_H^2 - 0,003Q_H^2 + 0,15Q_H - 1,875 - 0,0025Q_H^2 + \\
 &+ 0,225Q_H - 5,06 + 0,001Q_H^2 - 0,12Q_H + 3,6 = 0; \\
 &- 0,01087Q_H^2 + 0,255Q_H + 6,725 = 0; \\
 &Q_H^2 - 23,46Q_H - 619 = 0; \\
 &Q_H = 11,73 \pm \sqrt{11,73^2 + 619} = 11,73 \pm 27,50.
 \end{aligned}$$

Коренями цього рівняння будуть величини

$$Q'_H = 39,23 \text{ л/с} \quad \text{і} \quad Q''_H = -15,78 \text{ л/с.}$$

Але від'ємною витрата не може бути. Тому подача насосної станції буде 39,23 л/с. При цьому надходження з башти буде:

$$Q_B = \sum q_i - Q_H = (25 + 20 + 15) - 39,23 = 20,77 \text{ л/с.}$$

При такому розподілі подач між водоживлювачами в вихідній схемі в вузлах 2 і 3 не витримується умова $\sum q_{\text{вузл}} = 0$. Тому наведена схема не буде працездатною. Перевіримо, чи буде вона працездатною, якщо напрям руху води на ділянці 2-3 змінити на протилежний. Тоді схема приймає вигляд (рис. 7).

Якщо насосна станція буде подавати $Q_H = 39,23 \text{ л/с}$, напір її буде

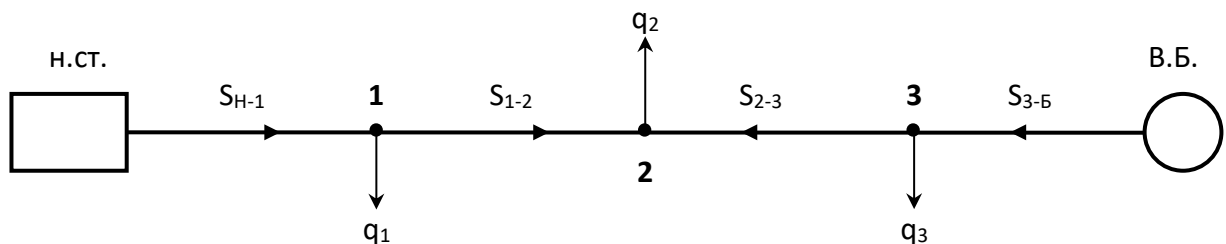


Рисунок 7.2 – Розрахункова схема

$$H = 45,06 - 0,00287Q^2 = 45,06 - 0,00287 \times 39,23^2 = 40,64 \text{ м.}$$

Тоді вільний напір в вузлі 2, який визначається напором насосної станції, буде дорівнювати

$$\begin{aligned}
 H_{2H} &= 40,64 - S_{H-1}Q_H^2 - S_{1-2}(Q_H - q_1)^2 = \\
 &= 40,64 - 0,0035 \times 39,23^2 - 0,003(39,23 - 25)^2 = 40,64 - 5,39 - 0,61 = 34,64 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Вільний напір в вузлі 2, який визначається напором водонапірної башти, буде

$$H_{2Б} = 35 - S_{3-Б} q_{3-Б}^2 - S_{2-3} q_{2-3}^2 = 35 - S_{3-Б} Q_{Б}^2 - S_{2-3} (Q_{Б} - q_3)^2 = \\ = 35 - 0,001 \times 20,77^2 - 0,0025 \times (20,77 - 15)^2 = 34,49 \text{ м.}$$

Напори в вузлі сходу потоків в межах точності розрахунку від різних водоживлювачів співпадають, тому такий режим роботи можливий.

Задача №2. Перевірити, чи можливо підключити до тупикової ділянки дворової мережі (вузол 1), яка наведена на рис.8, п'ятиповерховий будинок з витратою 5 л/с. Якщо напору не вистачає, визначити наскільки його необхідно підняти для нормального водопостачання. Величини витрат, загальних опорів, позначки землі Z_1 і п'єзометричної позначки Π_1 прийняти згідно з додатком А.

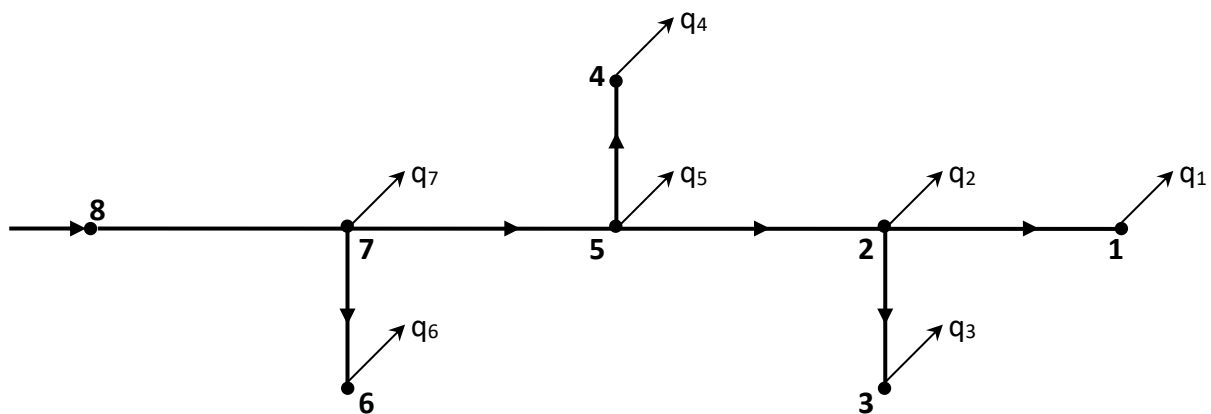


Рисунок 7.3 – Мережа, до якої повинен підключатися новий будинок

Розв'язування типової задачі

Припустимо, що мережа характеризується такими даними:

$$S_{1-2} = 0,002, S_{2-5} = 0,002, S_{5-7} = 0,003, S_{7-8} = 0,003 \text{ (для витрат в м}^3\text{/с)}, q_1 = 4 \text{ л/с}, \\ q_2 = 3 \text{ л/с}, q_3 = 2 \text{ л/с}, q_4 = 5 \text{ л/с}, q_5 = 2 \text{ л/с}, q_6 = 4 \text{ л/с}, q_7 = 3 \text{ л/с}, Z_1 = 40 \text{ м}, \Pi_1 = 66 \text{ м.}$$

Визначаємо розрахункові витрати на головній магістралі без врахування підключення в вузлі 1 нового будинку. Одержимо

$$q'_{1-2} = 4 \text{ л/с}, q'_{2-5} = 9 \text{ л/с}, q'_{5-7} = 16 \text{ л/с}, q'_{7-8} = 23 \text{ л/с.}$$

При підключенні в вузлі 1 нового будинку витрати на ділянках стануть рівними:

$$q_{1-2} = 9 \text{ л/с}, q_{2-5} = 14 \text{ л/с}, q_{5-7} = 21 \text{ л/с}, q_{7-8} = 28 \text{ л/с.}$$

Найдемо п'єзометричну позначку в початковій точці 8 без підключення нового будинку

$$P'_8 = P'_1 + h'_{1-2} + h'_{2-5} + h'_{5-7} + h'_{7-8} = \\ = 66 + 0,002 \times 4^2 + 0,002 \times 9^2 + 0,003 \times 16^2 + 0,003 \times 23^2 = 66 + 0,03 + 0,16 + 0,77 + 1,59 = 68,55 \text{ м.}$$

Визначаємо п'єзометричну позначку в вузлі 8, яка необхідна для забезпечення нормального водопостачання нового будинку.

$$P_8 = Z_1 + H_{5 \text{ нов.}} + h_{1-2} + h_{2-5} + h_{5-7} + h_{7-8}$$

де Z_1 – позначка поверхні землі в вузлі 1, $Z_1 = 40 \text{ м}$;

$H_{5 \text{ нов.}}$ - необхідний вільний напір для п'ятиповерхового будинку

$$H_{5 \text{ нов.}} = 6 + 4n = 6 + 4 \times 5 = 26 \text{ м,}$$

$h_{1-2}, h_{2-5}, h_{5-7}, h_{7-8}$ - втрати напору на ділянках при витратах на них з врахуванням витрати на будинок, який необхідно підключити до мережі .

$$h_{i-j} = S_{i-j} q_{i-j}^2,$$

$$h_{1-2} = S_{1-2} q_{1-2}^2 = 0,002 \times 9^2 = 0,16 \text{ м,}$$

$$h_{2-5} = S_{2-5} q_{2-5}^2 = 0,002 \times 14^2 = 0,39 \text{ м,}$$

$$h_{5-7} = S_{5-7} q_{5-7}^2 = 0,003 \times 21^2 = 1,32 \text{ м,}$$

$$h_{7-8} = S_{7-8} q_{7-8}^2 = 0,003 \times 28^2 = 2,35 \text{ м.}$$

Тоді

$$P_8 = 40 + 26 + 0,16 + 0,39 + 1,32 + 2,35 = 70,22 \text{ м.}$$

Напір в мережі недостатній для підключення п'ятиповерхового будинку, оскільки

$$P_8 > P'_8.$$

Вільний напір необхідно збільшити на величину

$$\Delta H = P_8 - P'_8 = 70,22 - 68,55 = 1,67 \text{ м.}$$

Задача №3. Для умов попередньої задачі визначити, на скільки знизяться напори в кожному вузлі, якщо напір в вузлі подачі буде постійним. При цьому загальний опір у всіх відгалуженнях буде постійним і рівним $S_{\text{від}} = 0,001$.

Розв'язування типової задачі

Використовуючи результати розв'язання попередньої задачі, знаходимо п'єзометричні позначки в кожному вузлі. Початкове положення:

$$P'_1 = 66 \text{ м; } P'_2 = P'_1 + h_{1-2} = 66 + 0,03 = 66,03 \text{ м;}$$

$$P'_3 = P'_2 - h'_{2-3} = P'_2 - S_{2-3} q_3^2 = 66,03 - 0,01 \times 2^2 = 65,99 \text{ м;}$$

$$P'_5 = P'_2 + h'_{2-5} = 66,03 + 0,16 = 66,19 \text{ м;}$$

$$\begin{aligned}
P'_4 &= P'_5 - h_{4-5} = P'_5 - S_{4-5} q^2_4 = 66,19 - 0,01 \times 5^2 = 65,94 \text{ м}; \\
P'_7 &= P'_5 + h'_{5-7} = 66,19 + 0,77 = 66,96 \text{ м}; \\
P'_6 &= P'_7 - h_{6-7} = P'_7 - S_{6-7} q^2_6 = 66,96 - 0,01 \times 4^2 = 66,80 \text{ м}; \\
P'_8 &= P'_7 + h_{7-8} = 66,96 + 1,59 = 68,55 \text{ м}.
\end{aligned}$$

П'єзометричні позначки після підключення будинку в вузлі 1. Якщо п'єзометрична позначка в початковій точці не зміниться і залишиться на позначці $P_8=68,55\text{м}$, тоді

$$\begin{aligned}
P_7 &= P'_8 - h_{7-8} = 68,55 - 2,35 = 66,20 \text{ м}, \\
P_6 &= P_7 - h_{6-7} = 66,20 - S_{6-7} q^2_6 = 66,20 - 0,01 \times 4^2 = 66,20 - 0,16 = 66,04 \text{ м}; \\
P_5 &= P_7 - h_{5-7} = 66,20 - 1,32 = 64,88 \text{ м}, \\
P_4 &= P_5 - h_{4-5} = P_5 - S_{4-5} q^2_4 = 64,88 - 0,01 \times 5^2 = 64,88 - 0,25 = 64,63 \text{ м}; \\
P_2 &= P_5 - h_{2-5} = 64,88 - 0,39 = 64,49 \text{ м}, \\
P_3 &= P_2 - h_{2-3} = P_2 - S_{2-3} q^2_3 = 64,49 - 0,01 \times 2^2 = 64,49 - 0,04 = 64,45 \text{ м}; \\
P_1 &= P_2 - h_{1-2} = 64,49 - 0,16 = 64,33 \text{ м}.
\end{aligned}$$

Вільний напір в будь-якому вузлі визначається залежністю

$$H_i = P_i - Z_i .$$

Тоді при приєднанні до мережі п'ятиповерхового будинку вільні напори в вузлах мережі знизяться до величин

$$\Delta H_i = (P'_i - Z_i) - (P_i - Z_i) = P'_i - P_i .$$

$$\begin{aligned}
\Delta H_1 &= 66 - 64,33 = 1,67 \text{ м}; \\
\Delta H_2 &= 66,03 - 64,49 = 1,54 \text{ м}; \\
\Delta H_3 &= 65,99 - 64,45 = 1,54 \text{ м}; \\
\Delta H_4 &= 65,94 - 64,63 = 1,31 \text{ м}; \\
\Delta H_5 &= 66,19 - 64,88 = 1,31 \text{ м}; \\
\Delta H_6 &= 66,80 - 66,04 = 0,76 \text{ м}; \\
\Delta H_7 &= 66,96 - 66,20 = 0,76 \text{ м}; \\
\Delta H_8 &= 66,55 - 66,55 = 0.
\end{aligned}$$

Практичне заняття 8. Перевіркові розрахунки елементів живлення в мережах транспортування води

Задача №1. Визначити, як зміниться подача насосних станцій №1 і №2, що обладнані насосами марки Д500-65 з характеристикою

$$H = 84,49 - 0,00098 Q^2,$$

при роботі на мережу, яка приведена на рис.9, якщо водорозбір в зоні “Б” збільшиться в 1,5 разів. Чисельні значення характеристик мережі прийняти по додатку А згідно з їх буквеним і індексним позначенням.

Розв’язування типової задачі

До початку розрахунку доцільно схему мережі спростити, замінивши витрати окремих зон зосередженими витратами, які відбираються з вузлів головної магістралі, до яких приєднується відповідна зона так, як це показано на рис.10. Величина цих зосереджених витрат визначається за формулою:

$$Q_k = \sum_{i=1}^n q_i,$$

де n – кількість вузлових витрат в зоні, яка розглядається,

q_i - величина вузлової витрати i -ого вузла.

Нехай величини вузлових витрат в л/с дорівнюють:

$q_1 = 15; q_2 = 20; q_3 = 3,0; q_4 = 3,0; q_5 = 3,5; q_6 = 10; q_7 = 20; q_8 = 15; q_9 = 5; q_{10} = 10; q_{11} = 15; q_{12} = 5; q_{13} = 10; q_{15} = 5; q_{16} = 10; q_{17} = 2,0; q_{18} = 15; q_{19} = 3,0; q_{21} = 10; q_{22} = 15; q_{23} = 20; q_{24} = 5; q_{25} = 35; S_1 = 0,0005$ (для Q в л/с); $S_2 = 0,0003; S_3 = 0,0002; S_6 = 0,0007$.

Тоді витрата в зоні “А” буде

$$\begin{aligned} Q_A = Q_{27} &= q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 = \\ &= 15 + 20 + 3,0 + 3,0 + 3,5 + 10 + 20 = 89,5 \text{ л/с} . \end{aligned}$$

Витрата в зоні “Б” буде

$$\begin{aligned} Q_B = Q_{28} &= q_9 + q_{10} + q_{11} + q_{12} + q_{13} + q_{15} + q_{16} + q_{17} + q_{18} + q_{19} + \\ &= 5 + 10 + 15 + 5 + 10 + 5 + 10 + 2,0 + 15 + 3,0 = 80 \text{ л/с} . \end{aligned}$$

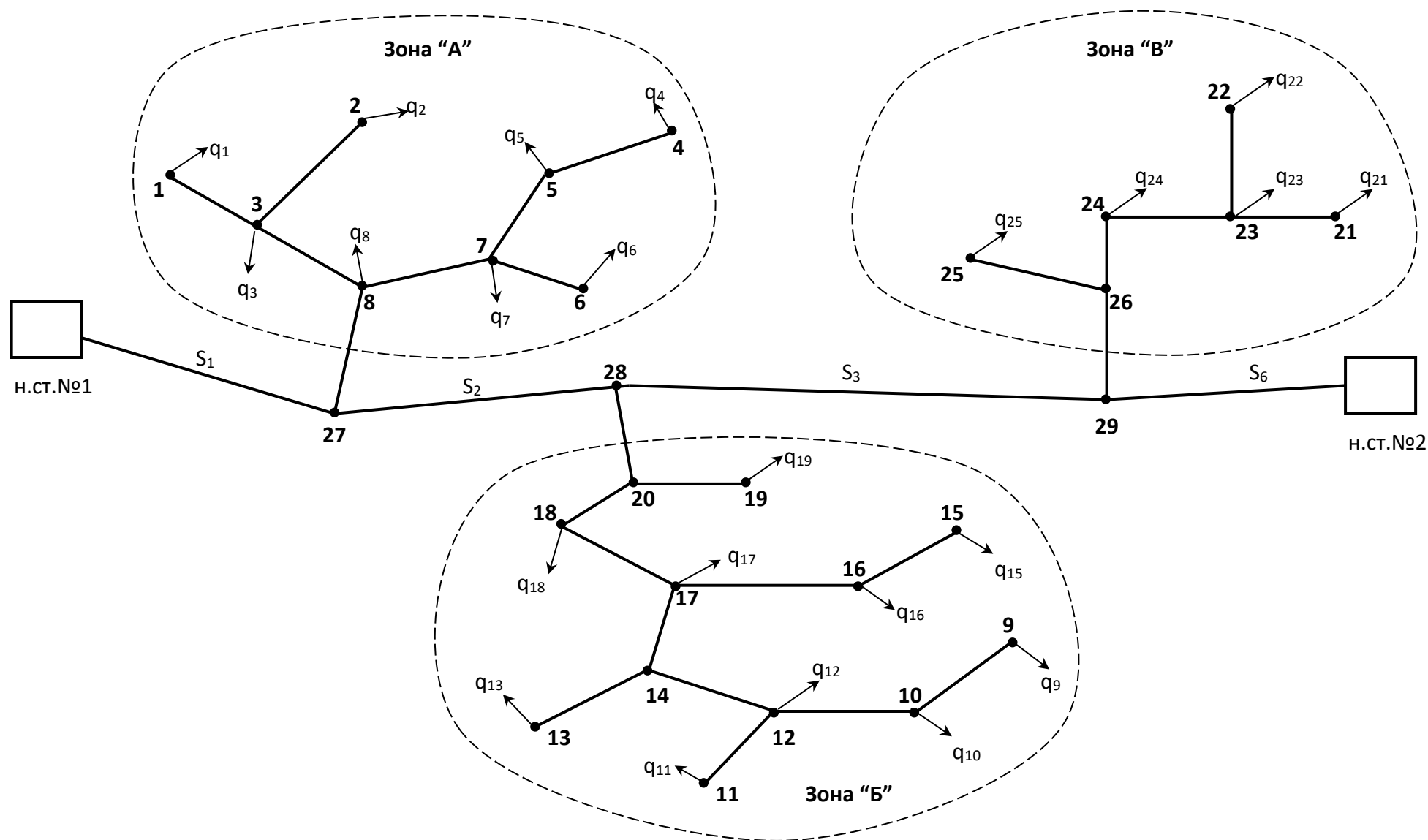


Рисунок 8.1 – Схема мережі

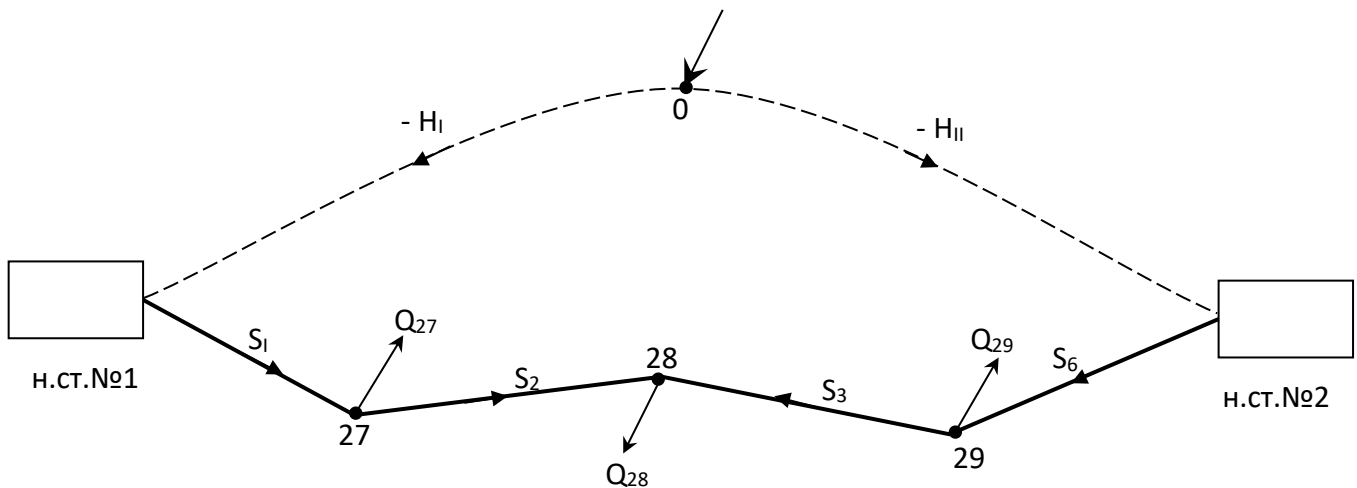


Рисунок 8.2 – Розрахункова схема мережі

Витрата в зоні “В” буде

$$Q_B = Q_{29} = q_{21} + q_{22} + q_{23} + q_{24} + q_{25} = 10 + 15 + 20 + 5 + 35 = 85 \text{ л/с} .$$

Для того, щоб з’ясувати, як зміниться подача насосних станцій після зростання водорозбору в зоні “Б”, треба з’ясувати, які подачі насосних станцій були спочатку. З цією метою треба скласти рівняння зовнішньої ув’язки. Виберемо довільну точку “0” (рис.10) і з’єднаємо її фіктивними лініями з насосними станціями. Отримаємо одне кільце, в яке входить головна магістраль мережі і дві фіктивні лінії, яким надається характеристика, що відображає відповідну характеристику насосних станцій. Умовно рахуємо, що в точку “0” подається загальна витрата обох насосних станцій $Q_I + Q_{II}$. Тоді напрям руху в фіктивних лініях буде від точки “0” до насосних станцій.

Загальна подача насосних станцій до збільшення водорозбору в зоні “Б” буде

$$Q_I + Q_{II} = \sum q_i = 89,5 + 80 + 85 = 254,5 \text{ л/с} .$$

Враховуючи, що обидві насосні станції облаштовані однаковими насосами, можна очікувати, що їх подачі не будуть сильно відрізнятися. Тоді зони живлення кожної з насосних станцій будуть сходиться в вузлі 28, а напрями руху води в ділянках головної магістралі будуть такими, як показано на рис.10. Рівняння зовнішньої ув’язки буде мати вигляд

$$H_I - S_1 Q_I^2 - S_2 (Q_I - Q_{27})^2 + S_3 (Q_{II} - Q_{29})^2 + S_6 Q_{II}^2 - H_{II} = 0 .$$

Напори насосів описуються залежностями

$$H_I = 84,49 - 0,00098 Q_I^2 ,$$

$$H_{II} = 84,49 - 0,00098 Q_{II}^2 = 84,49 - 0,00098 (254,5 - Q_I)^2 .$$

Тоді рівняння зовнішньої ув’язки прийме вигляд

$$84,49 - 0,00098Q_I^2 - S_1 Q_I^2 - S_2(Q_I - 89,5)^2 + S_3(254,5 - Q_I - 85)^2 + \\ + S_6(254,5 - Q_I)^2 - 84,49 + 0,00098(254,5 - Q_I)^2 = 0 .$$

Підставивши значення опорів окремих ліній, отримаємо

$$-0,00098Q_I^2 - 0,0005 Q_I^2 - 0,0003 (Q_I - 89,5)^2 + 0,0002(254,5 - Q_I - 85)^2 + \\ + 0,0007(254,5 - Q_I)^2 + 0,00098(254,5 - Q_I)^2 = 0 .$$

Розв'язуючи це рівняння, одержимо величину витрати Q_I , яка надходить від насосної станції №1.

$$\begin{aligned} & -0,00148Q_I^2 - 0,0003 (Q_I^2 - 179Q_I + 8010) + \\ & + 0,0002(169,5 - Q_I)^2 + 0,00168(254,5 - Q_I)^2 = 0 ; \\ & -0,00178Q_I^2 + 0,0537Q_I - 2,4 + 0,0002 (28730 - 339Q_I + Q_I^2) + \\ & + 0,00168(64770 - 509Q_I + Q_I^2) = 0 ; \\ & -0,0001Q_I^2 - 0,8014 Q_I + 106,41 + 5,75 - 0,0678 Q_I + 0,0002 Q_I^2 = 0 ; \\ & 0,0001Q_I^2 - 0,8692 Q_I + 112,16 = 0 ; \\ & Q_I^2 - 8692 Q_I + 1121600 = 0 ; \\ & Q_I = 4346 \pm \sqrt{4346^2 - 1121600} = 4346 \pm \sqrt{18887716 - 1121600} = 4346 \pm 4215; \\ & Q_I = 131 \text{ л/с} . \end{aligned}$$

Тоді

$$Q_{II} = 254,5 - 131 = 123,5 \text{ л/с} .$$

Якщо зросте відбір в вузлі 28 за рахунок того, що збільшиться водорозбір в зоні “Б” в 1,5 рази, то загальна витрата в системі стане

$$\Sigma q_i = 89,5 + 80 \times 1,5 + 85 = 294,5 \text{ л/с} .$$

Рівняння зовнішньої ув'язки в цьому випадку в принципі залишиться таким же, як уже розглянуто вище, за виключенням сумарного відбору:

$$\begin{aligned} & 84,49 - 0,00098Q_I^2 - S_1 Q_I^2 - S_2 (Q_I - 89,5)^2 + \\ & + S_3 (294,5 - 85 - Q_I)^2 + S_6 (294,5 - Q_I)^2 - 84,49 + 0,00098(294,5 - Q_I)^2 = 0 ; \\ & - 0,00098Q_I^2 - 0,0005 Q_I^2 - 0,0003 (Q_I^2 - 179Q_I + 8010) + \\ & + 0,002 (209,5 - Q_I)^2 + 0,00168(294,5 - Q_I)^2 = 0 ; \end{aligned}$$

$$- 0,00178Q_I^2 + 0,0537 Q_I - 2,4 + 0,0002 (43890 - 419Q_I + Q_I^2) + \\ + 0,00168 (86730 - 589Q_I + Q_I^2) = 0;$$

$$- 0,00178 + 0,0537 Q_I - 2,4 + 8,79 - 0,0838Q_I + \\ + 0,0002Q_I^2 + 145,71 - 0,99Q_I + 0,00168Q_I^2 = 0 ;$$

$$0,0001Q_I^2 - 1,020Q_I + 152,1 = 0 ;$$

$$Q_I^2 - 10200 + 1521000 = 0 ;$$

$$Q_I = 5100 \pm \sqrt{5100^2 - 1521000} = 5100 \pm \sqrt{26010000 - 1521000} = 5100 \pm 4949;$$

$$Q_I = 151 \text{ л/с} .$$

Тоді

$$Q_{II} = 294,5 - 151 = 143,5 \text{ л/с} .$$

Таким чином, якщо характеристики мережі і точка сходу потоків не змінюються, то при однакових насосах на насосній станції при зростанні відбору подача їх збільшується на одну і ту ж величину (20 л/с).

Задача №2. Перевірити, як зміниться подача насосних станцій для умов попередньої задачі, якщо від насосної станції №2 прокласти додатковий водогін, який змінює загальний опір на ділянці від вузла 29 до н.ст.№2 до величини такої ж, як і S_3 , тобто $S_6 = S_3$ (чисельні значення в додатку А).

Розв'язування типової задачі

Припустимо, що загальний опір ділянки S_6 став рівним 0,0001. Тоді в рівнянні ув'язки, яке було складено в попередній задачі, зміниться тільки опір на ділянці від вузла 29 до насосної станції №2. Тому воно після відповідних перетворень буде мати вигляд.

$$- 0,00178Q_I^2 + 0,0537 Q_I - 2,4 + 0,0002 (43890 - 419Q_I + Q_I^2) + \\ + 0,00108 (86730 - 589Q_I + Q_I^2) = 0;$$

$$- 0,00178Q_I^2 + 0,0537 Q_I - 2,4 + 8,79 - 0,0838Q_I + \\ + 0,0002Q_I^2 + 93,67 - 0,636Q_I + 0,00108Q_I^2 = 0 ;$$

$$- 0,0005Q_I^2 - 0,6662Q_I + 100,06 = 0 ;$$

$$Q_I^2 + 1332Q_I - 200120 = 0 ;$$

$$Q_I = - 666 \pm \sqrt{666^2 + 200120} = -666 \pm 802;$$

$$Q_I = 136,3 \text{ л/с}, \quad Q_{II} = 294,5 - 136,3 = 158,2 \text{ л/с} .$$

Отримані подачі показують, що при зменшенні загального опору останньої ділянки в 7 разів подача насосної станції №1 збільшиться на 4%, а насосної станції №2 – на 33%.

Задача №3. Скласти систему рівнянь і запропонувати чисельний метод їх розв’язування для визначення, які витрати будуть надходити в кожний напірний резервуар в мережі, яка приведена на рис.11. Якщо висота розміщення резервуару №1 відносно вісі насосної станції H_{p1} , а резервуару №2 – H_{p2} . Насосна станція обладнана робочими насосами типу Д500-65 з характеристикою

$$H = 84,49 - 0,00098Q^2.$$

Чисельні значення характеристик мережі прийняти по додатку А згідно з буквеним і індексним позначенням.

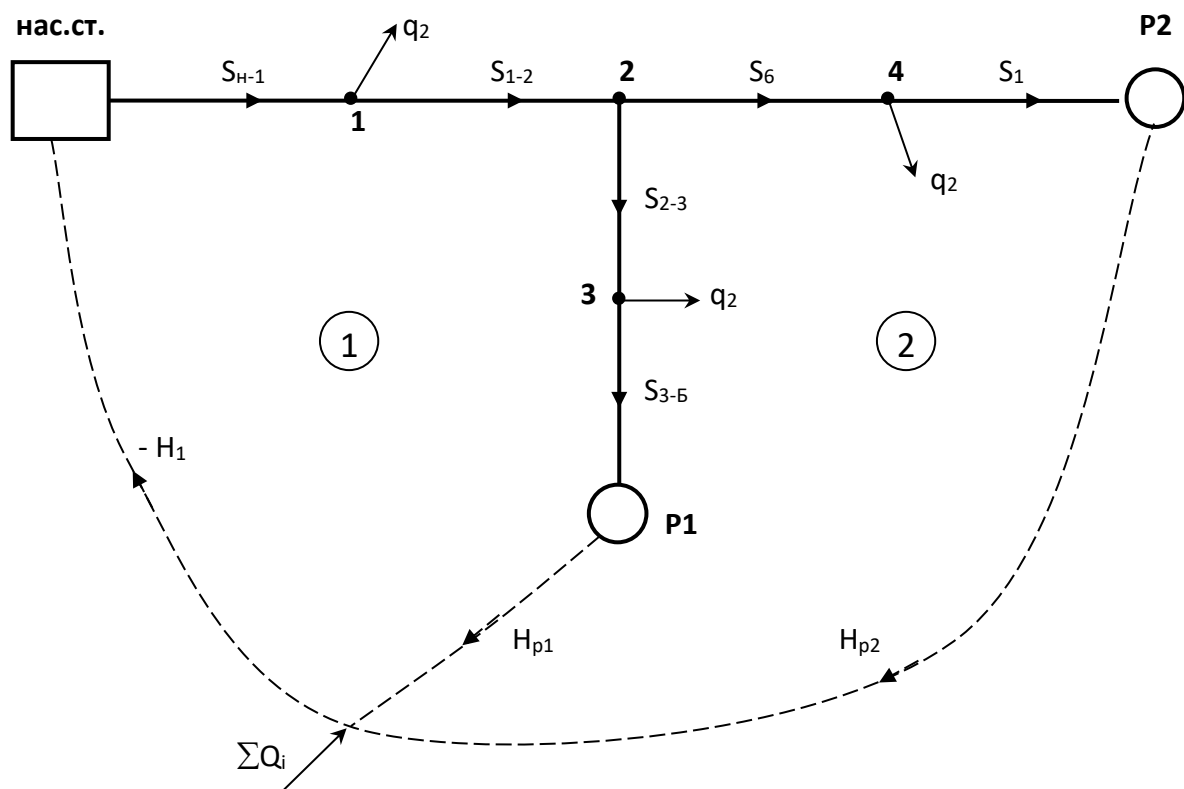


Рисунок 8.3 – Схема мережі

Розв’язування типової задачі

Вихідні дані: $q_{25}=3\text{л/с}$, $q_{26}=6\text{л/с}$, $q_{27}=5\text{л/с}$, $S_{н-1}=0,0035$ (для Q в л/с),
 $S_{1-2}=0,0031$, $S_{2-3}=0,0027$, $S_6=0,0007$, $S_{3-Б}=0,0011$, $S_1=0,00018$, $H_{p1}=11\text{м}$, $H_{p2}=6,3\text{ м}$.

Для визначення витрат, що будуть надходити в кожний напірний резервуар, треба скласти систему рівнянь, яка включає два рівняння зовнішньої ув’язки і балансові рівняння для витрат.

$$\left\{ \begin{aligned} & -H_1 + S_{H-1} Q_1^2 + S_{1-2} (Q_1 - q_{27})^2 + S_{2-3} (Q_1 - q_{27} - q_{25} - Q_{p2})^2 + \\ & + S_{3-B} (Q_1 - q_{27} - q_{26} - q_{25} - Q_{p2})^2 + H_{p1} = 0, \\ & -H_{p1} - S_{3-B} (Q_1 - q_{27} - q_{26} - q_{25} - Q_{p2})^2 - S_{2-3} (Q_1 - q_{27} - q_{25} - Q_{p2})^2 + \\ & + S_6 (Q_{p2} + q_{25})^2 + S_1 Q_{p2}^2 + H_{p2} = 0, \\ & Q_1 = q_{25} + q_{26} + q_{27} + Q_{p1} + Q_{p2}. \end{aligned} \right.$$

Підставимо в ці рівняння чисельні значення витрат, загальних опорів і характеристик насосів і резервуарів. Тоді одержимо систему рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} & -84,49 + 0,00098 Q_1^2 + 0,0035 Q_1^2 + 0,0031 (Q_1 - 5)^2 + \\ & + 0,0027 (Q_1 - 5 - 3 - Q_{p2})^2 + 0,0011 (Q_1 - 5 - 6 - 3 - Q_{p2})^2 + 11 = 0, \\ & -11 - 0,0011 (Q_1 - 5 - 6 - 3 - Q_{p2})^2 - 0,0027 (Q_1 - 5 - 3 - Q_{p2})^2 + \\ & + 0,0007 (Q_{p2} + 3)^2 + 0,00018 Q_{p2}^2 + 6,3 = 0, \\ & Q_1 = 3 + 6 + 5 + Q_{p1} + Q_{p2}. \end{aligned} \right.$$

Спростимо перше рівняння

$$\begin{aligned} & -84,49 + 0,00448 Q_I^2 + 0,0031 (Q_I^2 - 10 Q_I + 25) + \\ & + 0,0027 (Q_I - 8 - Q_{p2})^2 + 0,0011 (Q_I - 14 - Q_{p2})^2 + 11 = 0, \\ & -84,49 + 0,00448 Q_I^2 + 0,0031 Q_I^2 - 0,031 Q_I + 0,0775 + \\ & + 0,0027 (Q_I^2 - 16 Q_I - 2 Q_I Q_{p2} + 16 Q_{p2} + 64 + Q_{p2}^2) + \\ & + 0,0011 (Q_I^2 - 28 Q_I - 2 Q_I Q_{p2} + 28 Q_{p2} + 196 + Q_{p2}^2) + 11 = 0. \\ & -73,41 + 0,00758 Q_I^2 - 0,031 Q_I + 0,0027 Q_I^2 - 0,0432 Q_I - \\ & - 0,0054 Q_I Q_{p2} + 0,0432 Q_{p2} + 0,17 + 0,0027 Q_{p2}^2 + 0,0011 Q_I^2 - \\ & - 0,0308 Q_I - 0,0022 Q_I Q_{p2} + 0,0308 Q_{p2} + 0,22 + 0,0011 Q_{p2}^2 = 0, \\ & -73,02 + 0,01138 Q_I^2 - 0,105 Q_I - 0,0076 Q_I Q_{p2} + 0,074 Q_{p2} + 0,0038 Q_{p2}^2 = 0. \end{aligned}$$

Тепер спростимо друге рівняння

$$-11 - 0,0011 (Q_I - 14 - Q_{p2})^2 - 0,0027 (Q_I - 8 - Q_{p2})^2 +$$

$$\begin{aligned}
& + 0,0007 (Q_{p2}^2 + 6Q_{p2} + 9) + 0,00018 Q_{p2}^2 + 6,3 = 0 , \\
& - 4,7 - 0,0011(Q_I^2 - 28Q_I - 2Q_I Q_{p2} + 28Q_{p2} + 196 + Q_{p2}^2) - \\
& - 0,0027(Q_I^2 - 16Q_I - 2Q_I Q_{p2} + 16Q_{p2} + 64 + Q_{p2}^2) + \\
& + 0,0007Q_{p2}^2 + 0,0042Q_{p2} + 0,0063 + 0,00018Q_{p2}^2 = 0, \\
& - 4,69 - 0,0011Q_I^2 + 0,0308Q_I + 0,0022Q_I Q_{p2} - 0,0308Q_{p2} - 0,22 - \\
& - 0,0011Q_{p2}^2 - 0,0027Q_I^2 + 0,0432Q_I + 0,0054Q_I Q_{p2} - 0,0432Q_{p2} - 0,17 - \\
& - 0,0027Q_{p2}^2 + 0,0042Q_{p2} + 0,00088Q_{p2}^2 = 0, \\
& -5,08 - 0,0038Q_I^2 + 0,074Q_I + 0,0076Q_I Q_{p2} - 0,0698 Q_{p2} - 0,00292Q_{p2}^2 = 0.
\end{aligned}$$

Таким чином, система рівнянь, яку треба розв'язати буде мати вигляд:

$$\begin{cases}
-73,02 + 0,01138Q_I^2 - 0,105Q_I - 0,0076Q_I Q_{p2} + \\
+ 0,074Q_{p2} + 0,0038Q_{p2}^2 = 0, \\
-5,08 - 0,0038Q_I^2 + 0,074Q_I + 0,0076Q_I Q_{p2} - \\
- 0,0698Q_{p2} - 0,00292Q_{p2}^2 = 0, \\
Q_I = 14 + Q_{p1} + Q_{p2}.
\end{cases}$$

Розв'язати цю систему можна чисельними методами, використовуючи калькулятор чи ПЕОМ в такій послідовності:

а) Вибрати початкову можливу величину витрати Q_I , яку повинна подавати насосна станція, і величину кроку її зміни. Враховуючи умови задачі, витрата Q_I не може бути меншою загального розбору з мережі, тобто

$$Q_I = q_{25} + q_{26} + q_{27} + Q_{p1} + Q_{p2} = 3 + 6 + 5 + Q_{p1} + Q_{p2} = 14 + Q_{p1} + Q_{p2} .$$

Для умов задачі можна початкову витрату прийняти рівною $Q_{I\text{ноч}}=20\text{л/с}$. Для наступних кроків витрата визначається за формулою

$$Q_{Ii} = Q_{I(i-1)} + \Delta Q ,$$

де ΔQ – крок зміни витрат.

Величину ΔQ при розрахунках на калькуляторі можна прийняти 10л/с, при розрахунках на ПЕОМ – 0,1л/с.

б) Визначити кінцеву можливу величину витрати Q_1 , яку може подавати насосна станція. Виходячи з того, що найбільша висота резервуарів відносно вісі насосів 11м, теоретичний напір насосів не може бути меншим цієї величини. Враховуючи, що в мережі будуть втрати напору, можна прийняти мінімальний напір насосу $H_{\min}=12\div 15$ м. Тоді максимальна його подача буде

$$Q = \sqrt{\frac{84,49 - H_{\min}}{0,00098}} = \sqrt{\frac{84,49 - 12}{0,00098}} = 272 \text{ л/с.}$$

Таким чином, при кроках 5л/с чи 10л/с, кінцева величина витрати буде $Q_1=270\text{л/с}$.

в) Для величин Q_1 на кожному кроці визначити, користуючись першим рівнянням, витрату Q_{p2} , що буде надходити в резервуар №2. Розрахунки ведуться до тих пір, поки рівняння дають дійсний корінь. Потім знайти ті ж величини, користуючись другим рівнянням.

Для прикладу наводимо обчислення Q_{p2} по першому рівнянні при подачі насосної станції $Q_1=100\text{л/с}$ і для тих же умов – по другому рівнянні.

З першого рівняння одержимо:

$$\begin{aligned} & -73,02 + 0,01138 \times 100^2 - 0,105 \times 100 - 0,0076 \times 100 Q_{p2} + \\ & + 0,074 Q_{p2} + 0,0038 Q_{p2}^2 = 0, \\ & -73,02 + 113,8 - 10,5 - 0,76 Q_{p2} + 0,074 Q_{p2} + 0,0038 Q_{p2}^2 = 0; \\ & Q_{p2}^2 - 180,53 Q_{p2} + 7968 = 0, \\ & Q_{p2} = 90,26 \pm \sqrt{90,26^2 - 7968} = 90,26 \pm 13,4. \end{aligned}$$

Перший корінь рівняння $Q_{p2} = 76,6 \text{ л/с}$. Другий корінь не має фізичного змісту, тому що надходження в резервуар $Q_{p2} = 103,66 \text{ л/с}$ не може перевищувати подачу насосної станції $Q_1 = 100 \text{ л/с}$.

З другого рівняння одержимо:

$$\begin{aligned} & -5,08 - 0,0038 \times 100^2 + 0,074 \times 100 + 0,0076 \times 100 Q_{p2} - \\ & - 0,0698 Q_{p2} - 0,00292 Q_{p2}^2 = 0, \\ & -5,08 - 38 + 7,4 + 0,76 Q_{p2} - 0,0698 Q_{p2} - 0,00292 Q_{p2}^2 = 0, \\ & Q_{p2}^2 - 236,37 Q_{p2} + 12219 = 0, \\ & Q_{p2} = 118,19 \pm \sqrt{118,19^2 - 12219} = 118,19 \pm 41,83. \end{aligned}$$

Перший корінь рівняння $Q_{p2} = 76,36$ л/с, другий корінь не має фізичного змісту тому, що $Q_{p2} = 160,02 > 100$.

Результати розрахунків приведені в табл.8.1.

Таблиця 8.1 – Допоміжна таблиця для визначення Q_{p2}

Номер рівняння, за яким визначалась витрата Q_{p2}	Величина надходження в резервуар №2 Q_{p2} при подачі насосів Q_1 , л/с						
	70	80	90	100	110	120	140
I рівняння	160,79	171,24	142,60	76,6	дійсних коренів немає		
II рівняння	дійсних коренів немає			76,36	81,06	86,57	97,56

г) Співставити між собою величини Q_{p2} , які визначено по кожному із рівнянь на кожному кроці. Великою витрати Q_{p2} , що буде надходити в резервуар №2 буде та, яка за визначенням по першому і по другому рівняннях буде однакою. Насосна станція буде подавати витрату Q_1 , для якої отримана однакова величина Q_{p2} .

При розрахунках на ПЕОМ ці величини можуть бути визначені з точністю 0,1л/с.

При користуванні калькулятором для точного визначення величин Q_1 і Q_{p2} треба побудувати сумісні графіки $Q'_{p2}=f(Q_1)$ і $Q''_{p2}=f(Q_1)$, де Q'_{p2} і Q''_{p2} – величини витрат, що надходять в резервуар №2 при визначенні їх по першому і другому рівнянню відповідно. Точка перетину цих графіків дасть величини Q_1 і Q_{p2} (рис.12). Для графічного розв'язування системи рівнянь можна використати всі їх дійсні корені, навіть ті, які для умов задачі не мають фізичного змісту.

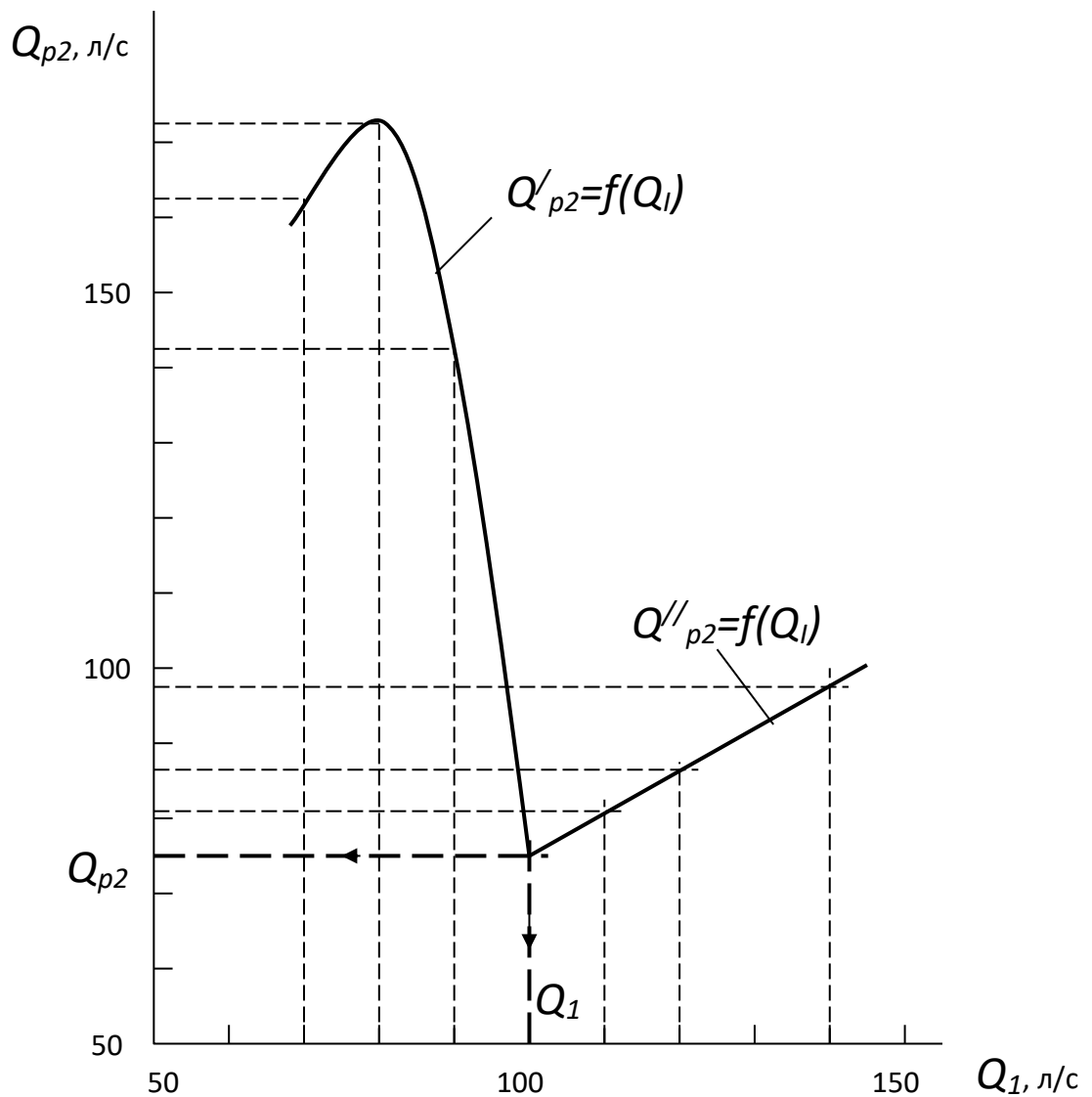


Рисунок 8.3 – Графічне розв’язування системи з першого і другого рівнянь

д) Користуючись третім рівнянням, визначити величину витрати , яка буде надходити в резервуар № 1.

Задача №4. Водопровідна мережа характеризується даними, які показані на рис.13. Вода в мережу подається трьома насосними станціями, які обладнані насосами марки Д500-65 з характеристиками, що описуються залежністю

$$H = 84,49 - 0,00098Q^2 .$$

Крім розбору води з мережі безпосередньо, частина води надходить в дві напірні ємності на промислових підприємствах, одна з яких знаходиться на висоті H_5 від вісі найнижчої насосної станції, а друга на висоті H_6 . Позначки вісів насосів насосних станцій дорівнюють відповідно Z_1, Z_2, Z_3 . Скласти систему рівнянь для визначення подач кожної насосної станції і витрат, які будуть надходити в резервуари

P1 і P2. Чисельні значення величин, що характеризують роботу мережі, прийняти по додатку А.

Розв'язування типової задачі

Нехай чисельні величини характеристик мережі будуть такими:

$Z_1 = 90\text{м}, Z_2 = 68\text{м}, Z_3 = 78\text{м}, H_5 = 60\text{м}, H_6 = 51\text{м}, q_1 = 25\text{л/с}, q_2 = 15\text{л/с}, q_3 = 25\text{л/с}, q_4 = 9\text{л/с}, q_5 = 10\text{л/с}, q_6 = 11\text{л/с}, q_7 = 5\text{л/с}, q_8 = 6\text{л/с}, q_9 = 8\text{л/с}, q_{10} = 7\text{л/с}, S_1 = 0,0002$ (для Q в л/с), $S_2 = 0,0001, S_3 = 0,00015, S_6 = 0,0005, S_7 = 0,001$.

Необхідно рівняння для визначення подач насосних станцій і витрат, що будуть надходити в напірні резервуари, можна скласти, якщо скористатися рівняннями зовнішньої ув'язки. З цією метою вибираємо довільну точку **О** (рис.13) і з'єднуємо її з кожним з насосних станцій та з кожним резервуаром (функції рівняння).

$$\left\{ \begin{aligned} & H_I - S_1 Q_I^2 - S_2 (Q_I - q_1)^2 - S_3 (Q_I - q_2)^2 - S_4 (Q_I - q_3)^2 - S_5 (Q_I - q_4)^2 - H_1 = 0, \\ & H_{II} - S_1 Q_{II}^2 - S_2 (Q_{II} - q_5)^2 - S_3 (Q_{II} - q_6)^2 - S_4 (Q_{II} - q_7)^2 - S_5 (Q_{II} - q_8)^2 - H_2 = 0, \\ & H_{III} - S_1 Q_{III}^2 - S_2 (Q_{III} - q_8)^2 + S_7 (q_8 + q_9 + q_{10} + Q_{p2} - Q_{III})^2 - \\ & - S_6 (q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + Q_{p2} - Q_{III})^2 - S_3 (q_6 + q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + Q_{p2} - Q_{III})^2 - \\ & - S_1 Q_{II}^2 - H_{II} = 0, \\ & H_{p2} + S_6 Q_{p2}^2 + S_3 (Q_{p2} + q_{10})^2 + S_2 (Q_{III} - q_8)^2 + S_1 Q_{III}^2 - H_{III} = 0, \\ & Q_I + Q_{II} + Q_{III} - Q_{p1} - Q_{p2} - \sum_{i=1}^{10} q_i = 0, \end{aligned} \right.$$

Підставимо в ці рівняння чисельні величини і спростимо їх.

Перше рівняння:

$$H_I - 0,0002 \times Q_I^2 - 0,0001 (Q_I^2 - 2 \times 25 Q_I + 25^2) - 0,00015 (Q_I^2 - 2 \times 40 Q_I + 40^2) - \\ - 0,0005 (Q_{p1}^2 + 2 \times 10 Q_{p1} + 100) - 0,001 Q_{p1}^2 - H_5 = 0,$$

$$H_I - 0,0002 \times Q_I^2 - 0,0001 Q_I^2 + 0,005 Q_I - 0,0625 - 0,00015 Q_I^2 + \\ + 0,012 Q_I - 0,24 - 0,0005 Q_{p1}^2 - 0,01 Q_{p1} - 0,05 - 0,001 Q_{p1}^2 - H_5 = 0,$$

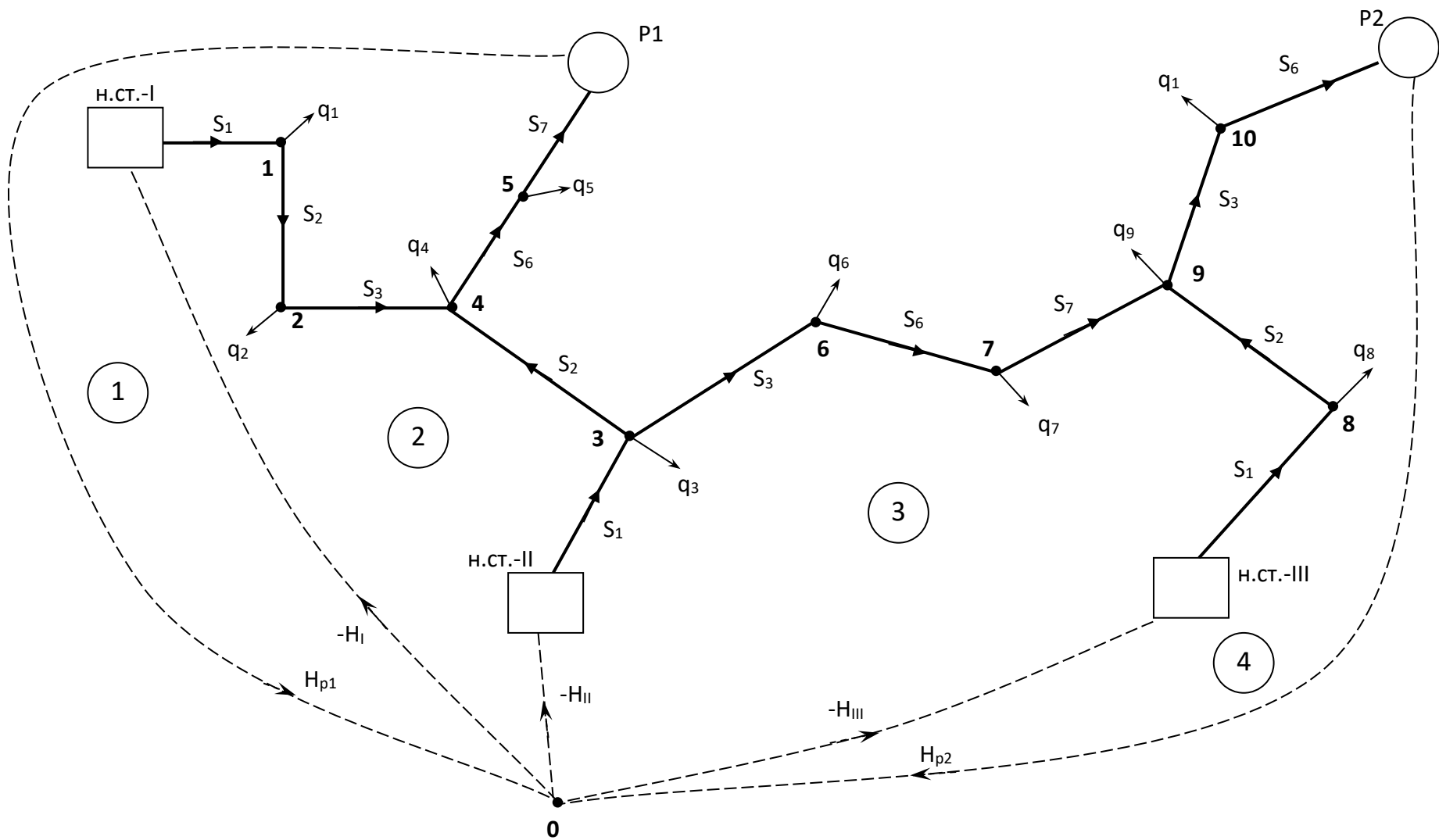


Рисунок 13 – Схема розподілу потоків і витрат води в водопровідній мережі

Виразимо всі напори і висоти резервуарів відносно вісі найнижчої насосної станції. Тоді відповідні напори насосних станцій стануть рівними:

$$H'_I = H_I + \Delta Z_1 = H_I + (Z_1 - Z_2) = 84,49 + 0,00098 Q_I^2 + 90 - 68 = 106,49 - 0,00098 Q_I^2,$$

$$H'_{II} = H_{II} + \Delta Z_2 = H_{II} + 0 = 84,49 - 0,00098 Q_{II}^2,$$

$$H'_{III} = H_{III} + \Delta Z_3 = H_{III} + (Z_3 - Z_2) = 84,49 - 0,00098 Q_{III}^2 + 78 - 68 = 94,49 - 0,00098 Q_{III}^2.$$

Підставимо величини напорів в перше рівняння:

$$106,49 - 0,00098 Q_I^2 - 0,00045 Q_I^2 + 0,017 Q_I - 0,3525 - 0,0015 Q_{p1}^2 - 0,01 Q_{p1} - 60 = 0.$$

Тоді в кінцевому вигляді перше рівняння буде таким:

$$46,14 - 0,00143 Q_I^2 + 0,017 Q_I - 0,0015 Q_{p1}^2 - 0,01 Q_{p1} = 0.$$

Спростимо друге рівняння:

$$H_{II} - 0,0002 Q_{II}^2 - 0,0001 (Q_{II} - q_3 - q_6 - q_7 - q_8 - q_9 - q_{10} - Q_{p2} + Q_{III})^2 +$$

$$+ 0,00015 (Q_I - q_1 - q_2)^2 + 0,0001 (Q_I - q_1)^2 - 0,0002 Q_I^2 - H_I = 0,$$

$$84,49 - 0,00098 Q_{II}^2 - 0,0002 Q_{II}^2 - 0,0001 (Q_{II} - 25 - 11 - 5 - 6 - 8 - 7 - Q_{p2} + Q_{III})^2 +$$

$$+ 0,00015 (Q_I - 25 - 15)^2 + 0,0001 (Q_I - 25)^2 - 0,0002 Q_I^2 - 51 = 0,$$

$$33,49 - 0,00118 Q_{II}^2 - 0,0001 (Q_{II} - 62 - Q_{p2} + Q_{III})^2 + 0,00015 (Q_I^2 - 80 Q_I + 1600) +$$

$$+ 0,0001 (Q_I^2 - 50 Q_I + 625) - 0,0002 Q_I^2 = 0,$$

$$33,49 - 0,00118 Q_{II}^2 - 0,0001 (Q_{II}^2 - 62 Q_{II} - Q_{II} Q_{p2} + Q_{II} Q_{III} - 62 Q_{II} +$$

$$+ 3844 + 62 Q_{p2} - 62 Q_{III} - Q_{II} Q_{p2} + 62 Q_{p2} + Q_{p2}^2 - Q_{p2} Q_{III} + Q_{II} Q_{III} -$$

$$- 62 Q_{III} - Q_{III} Q_{p2} + Q_{III}^2) + 0,00015 Q_I^2 - 0,012 Q_I + 0,24 + 0,0001 Q_I^2 -$$

$$- 0,005 Q_I + 0,0625 - 0,0002 Q_I^2 = 0,$$

$$33,79 - 0,00118 Q_{II}^2 - 0,0001 (Q_{II}^2 - 124 Q_{II} - 2 Q_{II} Q_{p2} + 2 Q_{II} Q_{III} + 3844 +$$

$$\begin{aligned}
& + 124Q_{p2} - 124Q_{III} + Q_{p2}^2 - 2Q_{p2}Q_{III} + Q_{III}^2) - 0,00005Q_I^2 - 0,017Q_I = 0 , \\
& 33,79 - 0,00118Q_{II}^2 - 0,0001Q_{II}^2 + 0,0124Q_{II} + 0,0002Q_{II}Q_{p2} - 0,0002Q_{II}Q_{III} - \\
& - 0,38 - 0,0124Q_{p2} + 0,0124Q_{III} - 0,0001Q_{p2}^2 + 0,0002Q_{p2}Q_{III} - 0,0001Q_{III}^2 - \\
& - 0,00005Q_I^2 - 0,017Q_I = 0 .
\end{aligned}$$

В кінцевому вигляді друге рівняння буде таким:

$$\begin{aligned}
& 33,41 - 0,00128Q_{II}^2 + 0,0124Q_{II} + 0,0002Q_{II}Q_{p2} - 0,0002Q_{II}Q_{III} - 0,0124Q_{III} - \\
& - 0,0001Q_{p2}^2 + 0,0002Q_{p2}Q_{III} - 0,0001Q_{III}^2 - 0,00005Q_I^2 - 0,017Q_I = 0 .
\end{aligned}$$

Спростимо третє рівняння

$$\begin{aligned}
& H_{III} - 0,0002Q_{III}^2 - 0,0001(Q_{III} - 8)^2 + 0,001(6 + 8 + 7 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - \\
& - 0,0005(5 + 6 + 8 + 7 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - 0,00015(11 + 5 + 6 + 8 + 7 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - \\
& - 0,0002Q_{II}^2 - H_{II} = 0 , \\
& 94,49 - 0,00098Q_{III}^2 - 0,0001(Q_{III}^2 - 16Q_{III} + 64) + 0,001(21 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - \\
& - 0,0005(26 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - 0,00015(37 + Q_{p2} - Q_{III})^2 - 0,0002Q_{II}^2 - 84,49 + \\
& + 0,00098Q_{II}^2 = 0 , \\
& 10 - 0,00098Q_{III}^2 - 0,0001Q_{III}^2 - 0,0016Q_{III} - 0,0064 + 0,001(441 + 42Q_{p2} - \\
& - 2Q_{p2}Q_{III} - 42Q_{III} + Q_{p2}^2 + Q_{III}^2) - 0,0005(676 + 52Q_{p2} - 2Q_{p2}Q_{III} - \\
& - 52Q_{III} + Q_{p2}^2 + Q_{III}^2) - 0,00015(1369 + 74Q_{p2} - 74Q_{III} - 2Q_{p2}Q_{III} + \\
& + Q_{p2}^2 + Q_{III}^2) + 0,00078Q_{II}^2 = 0 , \\
& 9,99 - 0,00108Q_{III}^2 - 0,0016Q_{III} + 0,441 + 0,042Q_{p2} - 0,002Q_{p2}Q_{III} - 0,042Q_{III} + \\
& + 0,001Q_{p2}^2 + 0,001Q_{III}^2 - 0,338 - 0,026Q_{p2} + 0,001Q_{p2}Q_{III} + 0,026Q_{III} -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - 0,0005Q_{p2}^2 - 0,0005Q_{III}^2 - 0,2054 - 0,0111Q_{p2} + 0,0111Q_{III} + 0,0003Q_{p2} Q_{III} - \\
& - 0,00015Q_{p2}^2 + 0,00015Q_{III}^2 + 0,00078Q_{II}^2 = 0.
\end{aligned}$$

В кінцевому вигляді третє рівняння буде таким:

$$\begin{aligned}
& 9,89 - 0,00043Q_{III}^2 - 0,0065Q_{III} + 0,049Q_{p2} - 0,0007Q_{p2} Q_{III} + 0,00035Q_{p2}^2 + \\
& + 0,00078Q_{II}^2 = 0.
\end{aligned}$$

Спростимо четверте рівняння:

$$\begin{aligned}
& 51 + 0,0005Q_{p2}^2 + 0,00015(Q_{p2} + 7)^2 + 0,0001(Q_{III} - 6)^2 + 0,0002Q_{III}^2 - 94,49 + \\
& 0,00098Q_{III}^2 = 0, \\
& - 43,49 + 0,0005Q_{p2}^2 - 0,00015(Q_{p2}^2 + 14Q_{p2} + 49) + 0,0001(Q_{III}^2 - 12Q_{III} + 36) + \\
& + 0,00118Q_{III}^2 = 0, \\
& - 43,49 + 0,0005Q_{p2}^2 - 0,00015Q_{p2}^2 - 0,002Q_{p2} - 0,00735 + 0,0001Q_{III}^2 - 0,0012Q_{III} + \\
& + 0,0036 + 0,00118Q_{III}^2 = 0.
\end{aligned}$$

В кінцевому вигляді четверте рівняння буде таким:

$$- 43,49 + 0,00035Q_{p2}^2 - 0,002Q_{p2} + 0,00128Q_{III}^2 - 0,0012Q_{III} = 0.$$

Таким чином, система рівнянь для визначення подач кожної з насосних станцій і витрат, що будуть надходити в кожний резервуар, буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
& 46,14 - 0,00143Q_I^2 + 0,017Q_I - 0,0015Q_{p1}^2 - 0,01Q_{p1} = 0, \\
& 33,41 - 0,00128Q_{II}^2 + 0,0124Q_{II} + 0,0002Q_{II}Q_{p2} - 0,0002Q_{II}Q_{III} - \\
& - 0,0124Q_{III} - 0,0001Q_{p2}^2 + 0,0002Q_{p2}Q_{III} - 0,0001Q_{III}^2 - 0,00005Q_I^2 - 0,017Q_I = 0,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 9,89 - 0,00043 Q_{III}^2 - 0,0065 Q_{III} + 0,049 Q_{p2} - 0,0007 Q_{p2} Q_{III} + \\
& + 0,00035 Q_{p2}^2 + 0,00078 Q_{II}^2 = 0, \\
& -43,49 + 0,00035 Q_{p2}^2 - 0,002 Q_{p2} + 0,00128 Q_{III}^2 - 0,0012 Q_{III} = 0, \\
& Q_I + Q_{II} + Q_{III} - Q_{p1} - Q_{p2} - 121 = 0.
\end{aligned}$$

Розв'язавши цю систему числовими методами, отримаємо необхідні характеристики водоживлювачів і резервуарів.

Вихідні дані для розв'язування задач

Показник		Величина показника при останній цифрі залікової книжки									
Вид	Одиниця виміру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_1	м	67	68,5	70	71	72	65	63	70	68	79,5
H_2	м	64	66	68	69,5	70,5	61,5	59	66	63,5	75,5
H_3	м	62	64,5	66,5	68	69,6	59,5	56,5	63	61	73
H_4	м	60,5	63	65	67	68,8	58	54,6	61	58,5	71
H_5	м	55,5	58,5	61	64	66	52	48,6	54,6	52	65,5
H_6	м	42	55	58	61	63,5	48	44	50	43,3	61,4
Q_1	л/с	100	90	80	70	60	110	120	130	140	150
Q_2	л/с	115	105	95	85	75	125	135	145	155	165
Q_3	л/с	123	113	103	93	83	133	143	153	163	173
Q_4	л/с	129	119	109	99	89	139	149	159	169	179
Q_5	л/с	146	136	126	116	106	156	166	176	186	196
Q_6	л/с	157	147	137	127	117	167	177	187	197	207
n	штук	3	4	2	3	4	5	2	3	4	5
K	разів	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
Z_1	м	92	89	86	81	79	97	100	105	110	115
Z_2	м	70	68	65	61	58	75	80	85	90	95
Z_3	м	82	79	75	71	67	91	96	101	106	111
Z_4	м	115	112	105	102	99	123	128	133	138	143
W_1	м ³	1,5	1,8	2,1	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3
W_2	м ³	1,8	2,1	2,3	2,7	2,6	2,1	2,2	2,3	2,5	2,7
P_1	МПа	0,25	0,27	0,30	0,35	0,37	0,40	0,40	0,35	0,35	0,30
$H_{бак}$	м	3	3,5	4,0	4,5	5,0	3,5	3,5	4,0	4,5	5,0
P_n	м.вод.ст	7	6	7	8	8	6	8	6	7	9
$H_{рез}$	м	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4
H_7	м	49	51	52	53	54	55	56	57	58	59
$S_{вс} \times 10^4$	(для Q	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2

	в л/с)										
$S_H \times 10^4$	(для Q в л/с)	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9

Продовження додатку А

Показник		Величина показника при останній цифрі номера залікової книжки									
Вид	Одиниця виміру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_1	л/с	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Q_2	л/с	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$S_1 \times 10^4$	(для Q в л/с)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,1	1,9	2,0	1,8	2,2
$S_2 \times 10^4$	(для Q в л/с)	1,0	1,0	0,9	0,9	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2	1,3
ΔZ_1	м	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
ΔZ_2	м	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
$S_3 \times 10^4$	(для Q в л/с)	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$S_6 \times 10^4$	(для Q в л/с)	6	5	6	5	7	8	7	6	6	7
ΔH	м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$S_4 \times 10^4$	(для Q в л/с)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$S_5 \times 10^4$	(для Q в л/с)	25	27	29	28	26	26	28	29	30	32
l_1	км	4,1	3,5	4,0	3,6	4,2	4,5	5,0	4,9	3,3	3,6
l_2	км	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,1	2,2	2,3	2,4
H_6	м	34,0	34,5	35,0	35,5	36,0	35,5	35,0	34,5	34,0	35,0
q_1	л/с	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
q_2	л/с	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
q_3	л/с	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$S_{H-1} \times 10^4$	(для Q в л/с)	35	36	37	38	39	40	39	38	37	36
$S_{1-2} \times 10^4$	(для Q в л/с)	30	31	32	33	34	33	32	31	30	29
$S_{2-3} \times 10^4$	(для Q	24	23	23	22	22	24	22	25	26	27

	в л/с)										
$S_{3-5} \times 10^4$	(для Q в л/с)	10	11	12	13	12	11	13	9	8	7
q_4	л/с	2	3	4	5	6	7	8	7	6	5
q_5	л/с	3	5	7	9	11	9	8	7	5	4
q_6	л/с	5	9	7	8	12	9	6	5	4	10
q_7	л/с	4	5	6	7	6	5	4	3	2	2
$S_{2-5} \times 10^4$	(для Q в л/с)	2	3	4	2,5	2,8	3,4	3,5	3,1	3,2	3,3
$S_{5-7} \times 10^4$	(для Q в л/с)	1	1,5	1,6	1,8	1,9	1,4	1,3	1,2	1,1	1,5
$S_{7-8} \times 10^4$	(для Q в л/с)	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1

Продовження додатку А

Показник		Величина показника при останній цифрі номера залікової книжки									
Вид	Одиниця виміру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
q_8	л/с	10	9	8	7	6	5	4	3	2	5
q_9	л/с	5	6	7	8	9	10	9	5	6	4
q_{10}	л/с	10	9	8	7	6	5	7	9	8	5
q_{11}	л/с	15	14	12	10	11	13	10	9	9	10
q_{12}	л/с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	6
q_{13}	л/с	9	10	11	12	13	14	15	16	17	12
q_{15}	л/с	4	5	4	3	1	2	1	3	1	3
q_{16}	л/с	6	7	8	9	10	11	10	9	8	8
q_{17}	л/с	5	4	3	4	2	1	3	4	6	2
q_{18}	л/с	15	14	13	12	11	10	9	8	7	9
q_{19}	л/с	4	4	5	4	6	5	4	5	8	6
q_{21}	л/с	8	9	10	11	12	13	14	15	16	11
q_{22}	л/с	17	17	15	14	13	10	9	8	9	10
q_{23}	л/с	19	18	17	19	18	17	19	18	17	15
q_{24}	л/с	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
q_{25}	л/с	35	34	33	32	31	32	33	34	35	32
q_{26}	л/с	55	56	57	58	59	58	57	56	55	56
q_{27}	л/с	50	49	48	47	46	45	46	47	48	46
H_{p1}	м	10	10,5	10	9	9	8,5	9,2	9,3	9,2	9,6
H_{p2}	м	6,2	6,3	6,0	6,2	6,1	6,0	6,1	6,2	6,3	6,1
$S_7 \times 10^4$	(для Q в л/с)	9	10	11	12	11	10	9	10	11	10
$S_8 \times 10^4$	(для Q в л/с)	20	21	22	20	21	22	21	20	19	20
$Q_{1к}$	л/с	26	27	28	25	28	27	26	27	25	26
$Q_{2к}$	л/с	31	32	33	31	33	32	30	32	31	30
$Q_{3к}$	л/с	36	37	38	36	38	37	35	37	36	35

Продовження додатку А

Показник		Величина показника при останній цифрі номера залікової книжки									
Вид	Одиниця виміру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_{4к}$	л/с	41	42	43	41	43	42	40	42	41	40
$Q_{5к}$	л/с	47	48	49	47	49	48	46	48	47	46
$H_{1к}$	м	52	51	50	52	50	51	52	51	50	52
$H_{2к}$	м	50,0	49,5	49	50	49	49,5	50	49,5	50	50
$H_{3к}$	м	48	47,5	47,5	48	47,5	47,5	48	47,5	48	48
$H_{4к}$	м	46	46	45,5	46	45,5	46	46,5	46	46	46,5
$H_{5к}$	м	44	44	43,5	44	43,5	44	44	44	44	44
l_3	м	14	15	19	16	22	19	21	18	20	17
φ	разів	1,4	1,6	1,6	1,7	2	1,9	2	1,7	2	1,8
n_0	шт	1	2	3	2	1	3	2	1	3	2
L	м	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
φ_2	разів	1,1	1,2	1,4	1,2	1,1	1,15	1,25	1,35	1,4	1,2
l_4	м	140	160	170	130	120	140	150	160	170	180
q_2	л/с	8	9	10	11	12	11	10	9	8	7
q_3	л/с	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
q_4	л/с	7	8	9	10	11	12	13	12	11	10
q_5	л/с	19	18	17	16	17	18	19	20	21	22
q_6	л/с	17	19	20	18	19	20	21	20	19	18
S_{1-2}	для q в л/с	0,0012	0,0013	0,0014	0,001	0,002	0,0015	0,0014	0,0013	0,001	0,002
S_{2-3}	для q в л/с	0,001	0,002	0,0015	0,002	0,003	0,0025	0,002	0,003	0,002	0,001
S_{3-4}	для q в л/с	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003	0,001	0,002	0,003
S_{4-5}	для q в л/с	0,003	0,001	0,003	0,0015	0,002	0,001	0,001	0,002	0,003	0,001
S_{5-6}	для q в л/с	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003
Σq_i	л/с	50	60	70	90	100	110	120	130	140	150
S_M	для Q в л/с	0,010	0,011	0,012	0,013	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010	0,010

ЛИТЕРАТУРА

Модуль 1

1. Arun K. Guidance for management of distribution system operation and maintenance / K. Arun // Prepared by sponsored by AWWA Research Foundation. 2008. 185 p.
2. Butler D. Leakage detection and management. A comprehensive guide to technology and practice in the water supply industry. / D. Butler // Published by Palmer Environmental. 2000. 124 p.
3. Деркач І.Л. Експлуатація інженерних мереж : конспект лекцій. Харків : ХНАМГ, 2013. 180 с. URL: https://eprints.kname.edu.ua/28904/1/2011%D0%9B%20%D0%9A%D0%BB%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B2%20%D0%A1%D0%91%D0%9E%D0%A0%D0%9A%D0%90_%D0%A4%D0%98%D0%9D%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%9D%D0%90%D0%AF_%D0%BD%D1%83%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf
4. Душкін С.С. Ресурсозберігаючі технології водопровідно-каналізаційного господарства : конспект лекцій по дисципліне. Харьков : ХНУГХ ім. А. Н. Бекетова, 2016. 92 с. URL: https://eprints.kname.edu.ua/44460/1/2014%2038%D0%9B%20%D0%A0%D0%B5%D1%81%D0%A1%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%92%D0%9A%2038%D0%9B_2014_%D1%87%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B A.pdf.
5. Liu Zheng Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems / Zheng Liu, Yehuda Kleiner, and Balvant Rajani // Institute for Research in Construction National Research Council Canada. – Ottawa: Ontario K1A 0R6 Canada, 2012. – 149 p.
6. Калініченко О. В., Плотник О. Д. Економіка підприємства. Практикум : [навчальний посібник]. К. : Кондор, 2012. 600 с.
7. Ліпич Л.Г., Буняк Н.М., Геліч Н.В. та інші. Економіка підприємства: навч. посіб. Луцьк : Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки. 2014. 608 с
8. Новохатній В.Г. Надійність водопостачання малих населених пунктів : навч. посібник. Полтава : ПНТУ, 2019. 102 с. URL : <https://www.twirpx.com/file/3063065/>.
9. Орлов В. О. Водопостачання та водовідведення: підручник. Київ : Знання, 2011 359 с.
11. Панков О. Інженерні мережі - «вузьке» місце ЖКГ. Инженерные сети из полимерных материалов. 2006. № 2. С. 20-23.
15. Хоружий П. Д., Ткачук О.А. Водопровідні системи і споруди : навч. посібник. Київ : Вища школа, 1993. 230 с.
16. Шульга М. О., Алексахін О.О., Шушляков Д. О. Теплогазопостачання та вентиляція : навч. посібник. Харків : ХНУМГ, 2015. 191 с.

Модуль 2

1. Гіроль М. М. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2003 році. Рівне, 2005. 143 с.
4. Ramesha Chandrappa. Sustainable and water engineering : theory and practice. Chichester, West Sussex : Wiley, 2014.
URL : https://www.worldcat.org/title/sustainable-and-water-engineering-theory-and-practice/oclc/866766820&referer=brief_results.
6. Степанова Н. Д., Степанов Д. В. Теплові мережі : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2009. 135 с.
7. Ткачук О.А. Шадура В.О. Водопровідні мережі : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2010. 148 с.
URL : <http://ep3.nuwm.edu.ua/5163/1/V83.pdf>.
8. Ткачук О.А. Міські інженерні мережі : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2015. 412 с.
URL:http://ep3.nuwm.edu.ua/3674/1/%D0%9C%D0%86%D0%9C_%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D1%83%D0%BA_%D0%92%20%D0%B7%D0%B0%D1%85.pdf.
9. Ткачук О. А. Удосконалення систем подачі і розподілення води населених пунктів. Рівне: НУВГП, 2008. 301с.
10. Шульга М.О, Деркач І.Л., Алексахін О.О. Інженерне обладнання населених місць : підручник. Харків : ХНАМГ, 2007. 259 с.
11. Федулова С.О. Економіка підприємств водопостачання та водовідведення : навч. посіб. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2017.300 с.
URL:https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/03/Ekonomika-pidpr.-vodopid.-ta-vodovid_Pivovarov_Fedulova.pdf.

Модуль 3

1. Баладінський В. Л., Лівінський О. М., Хмара Л. А. Будівельна техніка : навч. посіб. для студ. вузів. Київ : Либідь, 2001. 368 с.
2. Возняк О.Т. Теплогазопостачання і вентиляція: навчальний посібник. Львів, 2013. 273 с.
3. Кравченко В. С. Водопостачання та каналізація: підручник для внз. Київ, 2003. 286 с.
5. Линник І.Е., Завальний О.В. Проектування міських територій : підручник : [у 2 ч.]. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. Ч. 2. 544 с.
6. Мешкова-Клименко Н.А., Косогіна І. В Толстопалова Н.М.Технологія та обладнання одержання питної та технічної води : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 141 с.
URL: <http://tnr.kpi.ua/images/Methodichki/OSV.pdf>.
7. Сашко В.О., Терещенко Т.М. Водопостачання : навчальний посібник. Київ : Ресурсний центр ГУРТ, 2019 рік. 114 с.
URL:
<https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8/2020/04/28/4vodopostachannya.pdf>

8. Cheryl Jakab. Water Supply. Mankato, Minn. : Smart Apple Media. 2010. 32 p. URL: <https://archive.org/details/watersupply0000jaka/page/n1/mode/2up>.
9. Сафранов Т.А. Рациональне використання і охорона водних ресурсів: підручник. Київ : Либідь, 2006.
10. Сіденко Т.А. Водопостачання та водовідведення : анотований бібліографічний покажчик. Чернігів : Наукова бібліотека ЧНТУ, 2017. 24 с.
URL
[http://library2.stu.cn.ua/Files/downloadcenter/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20\(2\).pdf](http://library2.stu.cn.ua/Files/downloadcenter/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20(2).pdf)
11. Ткачук О. А., Шадура В. О. Водопровідні мережі : посібник. Рівне : НУВГП, 2004. 117 с.
12. Тугай А.М., Орлов В.О. Водопостачання : підручник. Київ : Знання, 2008. 735 с.
URL : http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2016/Tugaj_2009_735.pdf.
13. Хоружий П. Д., Ткачук О. А. Водопровідні системи та споруди: навчальний посібник. Київ : Вища школа, 1993. 230 с.
14. Єнін П. М., Швачко Н. А. Тепlopостачання. Частина 1 «Теплові мережі та споруди» : навч. посіб. Київ : Кондор, 2007. 244 с.

Модуль 4

1. Кудінов В.А. Гідравліка : підручник он-лайн, 2015.
URL : <https://stud.com.ua/33902/tovarovnavstvo/odravlika>.
2. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу: підручник . Київ, 2002. 358 с.
3. Krasowski E., Nikolenko I, Gliński J, Dashchenko A., Hydraulics. Hydraulics machines. Lublin : 9.Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. 350 p.
4. Мандрус В.І. Гідравлічні та аеродинамічні машини (насоси, вентилятори, компресори): підручник. Львів, , 2005. 338 с.
7. Прокопчук І. Т. Зміна гідравлічних та енергетичних характеристик насосів ЕЦВ і трубопроводів в процесі експлуатації свердловин / І. Т. Прокопчук, Ю. О. Береговий // Наук. техн. зб. «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки». – Вип. 2. – К: КНУБА, 2003. – С. 21-25.
8. Срібнюк С.М. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Основи теорії та застосування : навчальний посібник. Київ : Центр навчальної літератури, 2004. 328 с
9. Ткачук О. А. Зміни робочих характеристик насосних агрегатів систем подачі і розподілу води. Зб. наук. праць «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». Вип. 30. Рівне : НУВГП, 2005. С. 233-240.
10. Ткачук О. А., Шадура В. О., Новицька О. С. Скорочення енерговитрат та шляхи зменшення втрат води в системах водопостачання. Міжвідомчий. наук. зб. «Меліорація і водне господарство». Вип. 92. Київ : Вища школа, 2005. С. 165-173.
11. Garr M. Jones, Robert L. Sanks. Pumping Station Design, 3rd Edition. Butterworth-Heinemann; 2011. 1104 p.
URL: <https://www.elsevier.com/books/pumping-station-design/jones-pe-dee/978-1-85617-513-5>.
12. Холоменюк М. В., Ткачук А. В., Онопрієнко Д.М. Гідравлічні та аеродинамічні машини : навч. посібник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. 356 с.

Модуль 5

1. Бомба А. Я. Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки / А. Я. Бомба, В. М. Булавацький, В. В. Скопецький. — Київ: Наукова думка, 2007. — 308 с
2. Добровольська О.Г. Про можливість визначення фактичного поточкорозподілу у водопровідній мережі. Технологический аудит и резервы производства. Харьков : ПП «Технологический Центр». 2014. Вип. 4/1 (18). С. 8–12.
3. Добровольська О.Г. Розробка даних для контролю поточкорозподілу в реальному часі. Технологический аудит и резервы производства. Харьков : ПП «Технологический Центр». 2014. Вип. 4/1 (18). С. 8–12.
4. Добровольська О.Г. Про оперативність ліквідації витоків на водопровідних мережах. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць. Луцьк : Луцький НТУ, 2018. № 10. С. 50–57.
5. Лященко М.Я. Чисельні методи : підручник. Київ : Либідь, 1996. 288 с.
7. Шевченко Т.О., Ярошенко Ю.В. Насосні та повітродувні станції : навч. посібник. Харків : нац. ун-т міськ. госв ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ, 2015. 195 с URL : <https://core.ac.uk/reader/33755331>.
8. Лівінський О.М. та ін. Конструкції та технологія будівництва інженерних мереж та споруд : підручник. Київ : МП Леся, 2013. 232 с.

Модуль 6

1. Бомба А. Я. Моделювання нелінійно збурених процесів очищення рідин від багатокомпонентних забруднень / А. Я. Бомба, А. П. Сафоник. – Рівне: НУВГП, 2017. – 296 с
2. Добровольська О.Г., Українець М.О. Практична реалізація методів з оптимізації поточкорозподілу у водопровідних мережах. *Технологический аудит и резервы производства*. Харьков : ПП «Технологический Центр». 2014. № 6/4 (20). С. 4–7.
2. Dobrovolska O. Development of procedure to control flow distribution in water supply networks in real time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 6/8 (96). С. 17–24. DOI: 10.15587 / 1729-4061.2018.147656.
3. Добровольська О.Г., Українець М.О., Сокольниу В.І. Спосіб визначення витрат рідинних або газових середовищ в ділянках мереж транспортування. Пат. Україна : МПК G 01 F 1/34. № u 2012 03189; заявл. 19.03.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18. 5 с.
4. Добровольська О.Г., Українець М.О., Сокольниу В.І. Спосіб діагностики зон витоків з водопровідних мереж. Пат. Україна : МПК F 17 D 5/02. № u 2013 06473; заявл. 24.05.2013; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. 4 с.
6. Програма для проектування та аналізу роботи водопровідних мереж-Epanet. www.epanet.com/
7. Програма для проектування та аналізу роботи водопровідних мереж-WaterCAD@6.0/ / Haestad Methods. – www.haestad.com/watercad.

8. Сокольник В.І., Пієнко К.С. Експлуатація водопровідно – каналізаційного господарства. Частина 1. Експлуатація систем водопостачання: навчально – методичний посібник. ЗДІА, 2011. 133 с.
9. Сокольник В.І., Пієнко К.С. Експлуатація водопровідно – каналізаційного господарства. Частина 2. Експлуатація систем водовідведення: навчально – методичний посібник. ЗДІА, 2013. 151 с.

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. Водний кодекс України. URL :<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Тех>.
2. ДСТУ 7525:2014 Національний стандарт України. Вода питна. Вимоги та контролювання якості. [Чинний від 2015-02-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство економічного розвитку України, 2014. 26 с. URL: [www.http://iccwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf](http://iccwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf) (дата звернення: 21.01. 2021).
3. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 172 с. (Інформація та документація). URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>.
4. ДБН В.2.5-20:2018 Газопостачання. Основні положення проектування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 128 с. (Інформація та документація). URL: https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2019/04/DBN-V2520-18_Gas.pdf.
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». [Чинний від 2010-05-12]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 35 с. (Інформація та документація). URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/sanpin/dsanpin_2_2_4_171_10/25-1-0-1180.
6. Кабінет Міністрів України. URL : <https://www.kmu.gov.ua/>.
7. Законодавство України.. URL : <http://www.rada.kiev/ua>.
8. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: <http://library.znu.edu.ua/>
9. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/>
10. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/>
11. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення населених пунктів України: зміни, внесені згідно з Наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства № 302 від 27.11.2015. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-95>.