



Національний університет  
водного господарства та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та природокористування

**В.П. Косінов**  
**В.О. Орлов**

# **НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ**



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

*Навчальний посібник*

Рівне 2013



## **К71**

*Затвержено вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.  
(Протокол № 1 від 25 січня 2013 р.)*

### **Рецензенти:**

**Кір'янов В.М.**, доктор технічних наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування м. Рівне;

**Мартинов С.Ю.**, кандидат технічних наук, доцент Національного університету водного господарства та природокористування м. Рівне.

### **Косінов В.П., Орлов В.О.**

**К71** Надійність систем водопостачання та водовідведення.  
Навч. посібник. - Рівне: НУВГП, 2013. - 228 с.

Наведено основні поняття і терміни з надійності елементів і технологічних систем, а також принципи оцінки та забезпечення надійності систем водопостачання та водовідведення сучасних населених пунктів. Посібник вміщає необхідні рисунки, графіки, таблиці. В кожному розділі подано контрольні питання і завдання. У кінці книги наведено тестові завдання, термінологічний словник, список літератури і додатки.

Навчальний посібник підготовлено відповідно до програми дисципліни «Надійність систем водопостачання та водовідведення» і розрахований для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Будівництво» професійного спрямування «Водопостачання та водовідведення».

**УДК 628.1:192 (075)**

**ББК 38.761:30.14 я7**

© Косінов В.П., Орлов В.О., 2013

© Національний університет  
водного господарства та  
природокористування, 2013



## ВСТУП

Сучасні інженерні системи водопостачання та водовідведення являють собою складний взаємопов'язаний комплекс споруд, трубопроводів і обладнання. Всі ці споруди повинні мати достатній ступінь надійності, тобто забезпечувати пропуск необхідних витрат води, забезпечувати потрібну якість підготовки води або стічних вод, працювати без зупинок і тривалих ремонтів тощо. Розробкою питань надійності систем ВiВ займалися такі провідні фахівці як М.М.Абрамов, Ю.А.Ільїн, М.П.Белозеров, А.Я.Найманов, В.Г.Новохатній, І.І.Науменко, О.А.Ткачук та багато інших.

Метою вивчення дисципліни “Надійність систем водопостачання і водовідведення” є отримання студентами необхідних знань, вмінь та навичок із оцінки та технічного забезпечення надійності систем водопостачання та водовідведення населених пунктів і промислових підприємств, методик розрахунку показників надійності систем, підсистем, окремих споруд і елементів, зв'язок цих показників з технологічними, конструктивними характеристиками систем ВiВ, забезпечення вимог до якості проектування, будівельних матеріалів і виробів будівництва, промислової продукції, обладнання та експлуатації об'єктів, управління технологічними процесами, які забезпечують як конструктивну, так і експлуатаційну надійність.

Вивчення дисципліни базується на таких дисциплінах як гідравліка, геологія та гідрогеологія, насоси і насосні станції, машини та механізми, математика, фізика, хімія, опір матеріалів і будівельна механіка, метеорологія і стандартизація, водопостачання, водовідведення, санітарно-технічне обладнання будівель і споруд.



# ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

## 1.1. Означення основних понять і проблем надійності

**Надійність** це властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в граничних межах, відповідних заданим режимам і умовам використання. **Об'єктом** слід вважати як технічну систему в цілому, так і окремі її елементи, споруди, обладнання, механізми, виробу. Загалом, надійність це комплексна властивість, що включає такі поняття: *безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереження.*

Надійність, як наука має на меті вирішення наступних завдань:

- 1) визначати критерії та кількісні характеристики надійності систем водопостачання та водовідведення;
- 2) прогнозувати та зіставляти рівень ефективності, як при розробці систем, та і на період її експлуатації;
- 3) оцінити якість будівництва або реконструкції системи, обґрунтувати оптимальні інженерні рішення для досягнення потрібного рівня надійності.

Будь-який об'єкт або технологічна система, виріб перебуває у взаємодії і з середовищем, і з людиною, яка керує нею. Людина може сповільнити небажані для системи зміни, зробити так, аби відхилення якісних показників об'єкта траплялися протягом потрібного часу в допустимих межах, але усунути їх повністю не можливо. Надійність, що вивчає зміну показників якості з часом, є немовби динамікою якості, розгорткою в часі. При цьому кількісне накопичення необоротних процесів у об'єкті приводить до якісних змін параметрів, що відбуваються в процесі експлуатації і підпорядковуються закону переходу кількості в якість.

Системи життєзабезпечення населених міст для успішного виконання своєї функції повинні мати достатню міцність — здатність системи і її окремих елементів витримувати задані навантаження в процесі роботи; бути простими в експлуатації і економічними, тобто мати можливість успішно виконувати задані функції при мінімальній величині витрат на їх спорудження і експлуатацію. Проте на практиці необхідно упевнитись, що



система в процесі її експлуатації не тільки зможе, але і фактично готова і працюватиме, зберігаючи вказані властивості без неприпустимих знижень якості її функціонування. Подібна «упевненість» може бути обґрунтованою, якщо буде оцінена і забезпечена необхідна надійність системи.

Державна система забезпечення і оцінки надійності технологічних систем базується на нормативних документах (ГОСТи, ДСТУ, ДСТ) [3,4,8-10] та документах для технічного регулювання (СНіП, ДБН, ВБН, «Правилах технічної експлуатації систем водопостачання і водовідведення») [1,5-7,22-27] та рекомендованих методиках [15,17]Є, а також теорії імовірності та математичної статистики [18].

**Об'єкт** – предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, спорудження (виробництва), експлуатації, дослідження або випробовування на надійність. Об'єктами можна вважати системи та їхні елементи, а саме: споруди, установки, технічні вироби, пристрої, машини, апарати, прилади та їхні елементи (частини) та окремі деталі.

**Система** - об'єкт, що являє собою сукупність елементів, які взаємодіють у процесі виконання певного кола завдань та такі, що взаємодіють функціонально.

**Елемент** – (системи) - об'єкт, що являє собою найпростішу частину системи, окремі частини якого не є предметом розгляду в межах конкретного дослідження.

Поняття системи та елемента є виразом одного через друге, оскільки одне з них слід було б прийняти в якості вихідного. Ці поняття відносні: об'єкт, що враховується в якості системи в одному дослідженні, може розглядатися в якості елемента, якщо вивчається об'єкт більшого масштабу. Крім того, сам поділ системи на елементи залежить від характеру розгляду (функціональні, конструктивні, схемні або оперативні елементи), від необхідної точності проведення дослідження, від рівня наших уявлень, від об'єкта в цілому й, у кінцевому рахунку, навіть від технічних та наукового бачення дослідника.

**Технологічна система** - сукупність функціональних взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для виконання в межах регламентованих умов виробництва заданих технологічних процесів або операцій. До



предметів виробництва відносяться матеріали, заготовки, напівфабрикати та вироби, що знаходяться відповідно до виконання технологічного процесу в стадії зберігання, транспортування, формоутворення, обробки, збирання, ремонту, контролю та випробування. До регламентованих умов виробництва відносяться регулярність надходження предметів виробництва, параметри енергопостачання, параметри навколишнього середовища тощо.

Технологічні системи поділяються на чотири ієрархічних рівня **операцій; процесів; виробничих підрозділів; підприємств.**

**Виконавцем у технологічній системі** є людина, яка виконує в технологічній системі трудову діяльність у напрямку безпосередньої зміни та (або) визначення стану предметів виробництва, технічного обслуговування або ремонту засобів технологічного оснащення.

**Підсистема технологічної системи** це технологічна система, що виділяється за функціональними або структурними ознаками з технологічної системи більш високого рівня.

**Технологічний комплекс** це сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів або операцій.

**Елемент технологічної системи** це частина технологічної системи, що умовно приймається неподільною на даній стадії її аналізу. Наприклад, машина, пристрій, інструмент тощо.

Технологічні системи складаються з ряду елементів, які можуть бути з'єднані **послідовно** або **паралельно**.

**Послідовне з'єднання**  $n$  елементів у систему характеризується тим, що вихід з ладу одного, будь-якого елемента, призводить до непрацездатного стану всієї системи (рис.1.1.).

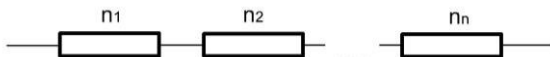


Рис. 1.1. Послідовне з'єднання елементів у системі

При **паралельному з'єднанні**  $n$  елементів до відмови системи приведе відмова тільки всіх елементів (рис. 1.2.). Систему з паралельним з'єднанням називають також системою **зі структурним резервуванням** елементів (резервованою). Можливі також системи з комбінуванням обох видів з'єднань.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

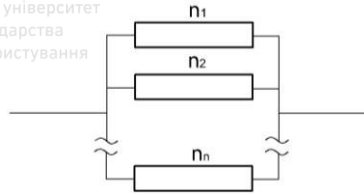


Рис. 1.2. Паралельне з'єднання елементів у систему

В нормативній літературі наводяться загальні терміни, які визначають стан об'єкта або технологічної системи.

**Справний стан** - це стан об'єкта, при якому він відповідає усім вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської документації.

**Несправний стан** - це стан об'єкта, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної та (або) конструкторської документації .

**Працездатний стан** - це стан об'єкта, при якому значення усіх параметрів, що характеризують властивість виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської документації .

**Непрацездатний стан** - це стан об'єкта, при якому значення хоча б одного з параметрів, що характеризують властивість виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної та (або) конструкторської документації.

**Припустимий стан** – стан об'єкта, при якому його подальше застосування за призначенням неприпустимо, недоцільно. Ознака або сукупність ознак припустимого стану об'єкта встановлені в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації .

**Працездатний стан технологічної системи** – це стан при якому значення параметрів та (або) показників якості продукції, яка виготовляється, продуктивність, матеріальні і вартісні витрати на виготовлення продукції відповідають вимогам, що встановлені у нормативно-технічній та (або) конструкторській документації. Параметрами продуктивності є номінальна та циклова продуктивність, поштучний час і т.п., параметрами матеріальних і вартісних витрат є витрати сировини, матеріалів, енергії, інструментів, вартість технічного обслуговування та ремонту тощо.

**Непрацездатний стан технологічної системи** це стан технологічної системи, при якому значення хоча б одного з

параметрів та (або) показників якості виготовлення продукції, продуктивності матеріальних та вартісних витрат на виготовлення продукції не відповідає вимогам, що встановлені в нормативно-технічній та (або) конструкторській і технологічній документації. Він може бути за параметрами продукції або продуктивності.

**Відмова** - це подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

**Повна відмова** – повне припинення роботи системи.

А.Я.Найманов пропонує для систем ВіВ ряд додаткових термінів [15]: **аварійний стан** – має місце у випадку відмови основних елементів, що призводить до різкого порушення працездатності системи; **кризисний стан** – виникає у випадку низки відмов елементів, що призводить до зниження продуктивності систем та задіяння резервів у разі відсутності запасу надійності, криза може переходити в аварію; **ремонтний стан** – має місце в разі відключення окремих елементів для проведення планових і профілактичних ремонтів; **надзвичайна ситуація** – процес переходу системи з одного стану в інший, що викликане різними впливами на систему.

## 1.2. Відмови систем та їх відновлення

Поняття «відмови» є одним з основних у теорії надійності.

**Пошкодження** – подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану.

**Критерій відмови** – ознака або сукупність ознак непрацездатного стану об'єкта, які встановлені в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

**Функціональна відмова технологічної системи** – відмова технологічної системи, у наслідок якої настає припинення її функціонування, непередбачена регламентними умовами виробництва або в конструкторській документації.

**Параметрична відмова технологічної системи** - відмова технологічної системи, при якій зберігається її функціонування, але виникає вихід значень одного, або кількох параметрів технологічного процесу за межі, які встановлені нормативно-технічною та (або) конструкторською й технологічною документацією.





**Власна відмова технологічної системи**– відмова технологічної системи, яка викликана порушенням працездатного стану її елементів та (або) функціональних зв'язків між ними.

**Примусова відмова технологічної системи**– відмова технологічної системи, яка викликана порушенням регламентованих для цієї системи умовами виробництва.

**Відмова технологічної системи за параметрами продукції** – відмова технологічної системи, у наслідок якої значення хоча б одного параметра, або показника якості продукції, що виготовляється, не відповідає тим вимогам, які встановлені у нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

**Відмова технологічної системи за продуктивністю** – відмова технологічної системи, у наслідок якої значення хоча б одного параметра продуктивності технологічної системи не відповідає значенням, які встановлені в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

**Відмова технологічної системи за витратами**– відмова технологічної системи, у наслідок якої значення хоча б одного параметра матеріальних, або вартісних витрат не відповідає значенням, які встановлені у технічній документації.

**В.Д. Дмитрієв [29]** пропонує класифікувати відмови систем ВіВ за наступним принципом:

<b>Ознака відмови</b>	<b>Визначення відмови</b>
<b>1.ВИДИ ВІДМОВ ЗА ХАРАКТЕРОМ ВИЯВЛЕННЯ</b>	
<i>За термінами появи</i>	
<b>Миттєва</b>	Відмова, що характеризується скачкоподібною зміною значень одного або декількох основних параметрів
<b>Поступова</b>	Відмова, що характеризується поступовою зміною значень одного або декількох основних параметрів об'єкта
<i>За характером взаємозв'язку між собою</i>	
<b>Незалежна</b>	Відмови, що не обумовлені пошкодженнями або відмовами інших елементів об'єкта
<b>Залежна</b>	Відмова, що обумовлена пошкодженням або відмовами інших елементів об'єкта

*За обсягами наслідків*

<b>Повна</b>	Відмова, після якої використання об'єкта за призначенням до відновлення його працездатного стану неможливе.
<b>Часткова</b>	Відмова, після якої використання об'єкта за призначенням можливе, але при цьому значення одного або декількох основних параметрів знаходяться поза припустимими межами
<i>За об'ємом і характером відновлення</i>	
<b>Розладнання</b>	Відмова, що визначається порушенням взаємодії між причинами і наслідками дії на ці причини (наприклад, невідповідність до зреагента зміненим параметрам води)
<b>Пошкодження</b>	Відмова, яка приводить до незначного порушення працездатності
<b>Аварія</b>	Відмова, що призводить до повного виходу об'єкта або окремих його елементів з працездатного стану
<i>За способом усунення відмови</i>	
<b>Збій</b>	Самоусунена відмова, що характеризується тимчасовою втратою працездатності
<b>Повторювана</b>	Багаторазово повторювана відмова (збій) з одним і тим самим характером ушкодження.
<b>Незворотна</b>	Відмова, що усувається в наслідок зовнішнього впливу
<i>За повторюваністю</i>	
<b>Систематична</b>	Відмова певного виду об'єктів, що виникає багаторазово за однією тою самою причиною та має один і той самий механізм виникнення та протікання відмови
<b>Несистематична</b>	Відмова, яка виникає однократно за різних причин

## 2. ВИДИ ВІДМОВ ЗА ПРИЧИНАМИ ЇХ ВИНИКНЕННЯ

*Відмови, пов'язані з людьми*

<b>Конструкційні</b>	Відмови, що виникають у наслідок помилок при конструюванні або недосконалості конструкції
<b>Виробничі</b>	Відмови, що виникають у наслідок порушення або недосконалості технології процесу виробництва продукції
<b>Експлуатаційні</b>	Відмови, що виникають у наслідок порушення встановлених умов експлуатації

*Відмови, пов'язані з станом пристроїв, матеріалу і т.п.*

<b>Стомлюванні</b>	Відмови, що виникають у наслідок руйнування матеріалів об'єкта за рахунок стомлення.
<b>У наслідок зношування</b>	Відмови, що виникають внаслідок зношування елементів виробу.
<b>У наслідок старіння</b>	Відмови, які виникають у наслідок впливу процесу старіння матеріалу виробу

## 3. ВИДИ ВІДМОВ ЗА ВИДОМ І МАСШТАБОМ ШКОДИ

<b>Критична</b>	Відмова, яка створює небезпеку для людей та призводить до значних матеріальних збитків
<b>Значна</b>	Відмова, яка не створює небезпеки для людей, але призводить до значних матеріальних втрат.
<b>Незначна</b>	Відмова, у разі виникнення якої мають місце незначні матеріальні втрати

**А.Я.Найманов** пропонує додаткові визначення відмов *за термінами виникнення*:

- відмови періоду пристосування;
- відмови періоду нормальної експлуатації;
- відмови періоду інтенсивного зношування.

Усунення відмови та причин, які її обумовлюють відбувається в наслідок *технічного обслуговування, відновлення робочого стану, або ремонту.*



**Відновлення** – процес виявлення і усунення відмови (пошкодження) з метою відновлення його працездатності (справності).

**Об'єкт, що здатний до обслуговування** - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

**Об'єкт, що не здатний до обслуговування** - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

**Відновлюваний об'єкт** - об'єкт, для якого в ситуації, що розглядається проведення відновлення працездатного стану передбачено в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації. **Невідновлюваний об'єкт** - об'єкт, для якого у в ситуації, що розглядається проведення відновлення працездатного стану не передбачено в нормативно-технічній та (або) конструкторській документації.

Тобто, *відновлювані об'єкти* у процесі виконання своїх функцій допускають ремонт, а *невідновлювані* - не підлягають ремонту та відновлюються шляхом заміни на нові. Вказані вище поняття є умовними. Так, *відновлюваними* слід вважати елементи, які *не можуть бути відновленими* після пошкодження, але ті, які *можна у разі необхідності відновити в певних, заданих умовах їхньої роботи*. Системи водопостачання і водовідведення в цілому та їхні основні підсистеми є *відновлюваними об'єктами*.

### 1.3. Подія та ймовірність її появи

Залежність надійності технологічних систем та окремих її елементів від різних імовірнісних факторів призводить до того, що поява відмов має *випадковий характер*. Оцінка надійності об'єкта за допомогою математичних методів на підставі узагальнення накопиченої статистичної інформації про роботу окремих споруд та їхніх елементів за реальних умов експлуатації дає змогу виявити імовірнісні закономірності та співвідношення між випадковими функціями, що по-різному впливають на показники надійності технологічної системи (об'єкта). Для виявлення цих закономірностей застосовують математичну науку - теорію ймовірностей, яка вивчає закономірності випадкових масових явищ.



Основними методами даної науки є дослід, спостереження, експеримент.

У теорії ймовірностей та в математичній статистиці використовують поняття випробування (дослід), подія, випадкова величина, імовірність події, статистична ймовірність події, частота й частість.

**Випробування** - це практичне здійснення деяких умов і правил.

**Подія** — явище, що відбувається внаслідок випробування. Таким чином, експлуатація об'єкта відповідно до заданих умов — це випробування, а виникнення відмови за певний час — подія. Події ризяться між собою за ступенем можливості їхнього виявлення та взаємозв'язку та поділяються на: вірогідні, випадкові, неможливі, сумісні (несумісні), залежні (незалежні) тощо.

**Вірогідна подія** - така подія, що неодмінно має відбутися (позначимо її символом **E**). Прикладом вірогідності події є зміна геометричних параметрів поверхонь тертя деталей унаслідок зношування при експлуатації. **Випадкова подія** — подія, яка внаслідок проведеного дослідження може відбутися або не відбутися. Позначимо випадкову подію символом **A**. **Неможлива подія** — це така подія, що явно не відбувається. Прикладом служить незношене робоче колесо насоса, який знаходився в тривалій експлуатації.

**Сумісні (несумісні) події** — такі події, поява однієї з яких виключає (виключає) можливість появи іншої. Наприклад, відмова електродвигуна (протягом певного часу) не може виключати відмови підшипників робочого колеса — це сумісні події. Але відмова, працездатність двигуна це події несумісні, бо вони не можуть виникнути одночасно. Залежні (незалежні) події — це події, поява однієї з яких впливає (не впливає) на появу іншої події. Наприклад, виникнення відмови засувки на всмоктувальній лінії й нагнітальній лінії насоса — це незалежні події, а відмова запірного органу засувки, і відмова всієї засувки — події залежні.

**Рівноможливі події** — кілька можливих подій, що виникають під час дослідження (випробування).

**Протилежна подія** — подія, протилежна обраній.

Для того щоб кількісно порівняти між собою події за ступенем можливості їхнього виникнення, треба з кожною подією зв'язати певне число, яке буде тим більшим, чим можливіша подія. Таке число дістало назву ймовірність події. На підставі дослідів ми

вважаємо найбільш імовірними ті події, що відбуваються частіше, менш імовірними — ті, що відбуваються рідше, і, нарешті, малоімовірними — ті, які майже ніколи не відбуваються.

**Статистична ймовірність (частість)** вірогідної події чисельно дорівнює одиниці, в інших випадках події — можливі, але невірогідні. Вони характеризуються ймовірностями, меншими за одиницю. Імовірність появи неможливої події, природно, дорівнює нулю. Статистична ймовірність події  $A$  позначається  $P(A)$ , тоді  $0 \leq P(A) \leq 1$ . Випадок називається сприятливим стосовно події, якщо поява цього випадку спричиняє появу даної події.

Імовірність появи події  $A$  у цьому випадку обчислюється як відношення числа сприятливих випадків до загального числа випадків:

$$P(A) = \frac{m}{N}, \quad (1.1)$$

де  $m$  — кількість сприятливих випадків;  
 $N$  — загальна кількість випадків.

Формула справедлива лише тоді, коли дослід зводиться до системи випадків, тобто має симетрію можливих наслідків. Закономірність випадкових явищ на практиці можна виявити лише за умови багаторазового повторення експерименту, виконуваного за незмінних умов.

**Частота подій** — це кількість однакових чи близьких (здобутих у наслідок спостереження) подій або абсолютних значень випадкової величини, об'єднаних в одну групу (інтервал), розряд.

Відношення  $m/N$  називають частістю:

$$p = \lim_{N \rightarrow \infty} (m/N) = m/N. \quad (1.2)$$

Обчислена в такий спосіб імовірність називається статистичною, бо її отримали в результаті випробувань (дослідів) на підставі статистичних даних.

#### 1.4. Показники надійності

У загальному випадку, нормальний цикл експлуатації обладнання включає: підготовку до роботи; безвідмовну роботу; простій; профілактичні заходи. Нормальний цикл роботи



обладнання порушується за рахунок випадкових подій (відмов) і відновлень працездатності.

**Показники надійності** – це кількісні характеристики одного або декількох властивостей. Розрізняють *одиничні* та *комплексні* показники надійності. **Одиничний показник** кількісно характеризує тільки одну ознаку надійності об'єкта. Показники надійності мають *ймовірнісний характер*. Їм надають *статистичне* та *ймовірнісне* визначення. Перші необхідні для оцінки показників надійності за результатами експлуатації обладнання в системах ВІВ, або спеціальних випробувань з метою встановлення рівня їхньої надійності. Другі – у випадках теоретичного аналізу надійності окремих споруд і систем ВІВ.

**Безвідмовність** – це властивість споруд та систем зберігати працездатність протягом терміну або деякого напрацювання. Вона може бути оцінена ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$ , інтенсивністю відмов  $\lambda(t)$ , середнім напрацюванням на відмову  $\bar{t}$ , параметром потоку відмов  $\omega(t)$ , середнім терміном напрацювання на відмову  $\bar{t}$  та  $\gamma$ -відсотковим напрацюванням до відмови  $\bar{t}_\gamma$ .

**Довговічність** – властивість об'єкту зберігати працездатний стан до появи неприпустимого стану (після якого застосування за призначенням неприпустиме або недоцільне) при встановленій системі обслуговування та ремонту. Довговічність характеризується середнім ресурсом (терміном служби)  $t_p$ ,  $\gamma$ -відсотковим ресурсом  $\bar{t}_\gamma$ , призначеним ресурсом  $t_n$ , середнім терміном служби  $t_{cp}$ ,  $\gamma$ -відсотковим ресурсом, терміном служби  $t_{\gamma cp}$ , призначеним терміном служби  $t_{н.с.}$ .

**Ремонтпридатність** – це властивість або придатність споруд та систем до попередження і виявлення причин виникнення відмов, підтриманню і відновленню працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів. Цей параметр характеризується ймовірністю відновлення працездатного стану  $P(\bar{t}_g)$ , середнім терміном відновлення працездатного стану  $\bar{t}_g$ .

**Збережуваність** – властивість споруд і систем зберігати протягом та після зберігання (транспортування) працездатний стан.



збережуваності  $\bar{t}$ ,  $\gamma$ -відсотковим ресурсом збережуваності  $\bar{t}_\gamma$ .

При оцінці *невідновлюваних елементів* технологічних систем умовно передбачають, що в разі випробування (дослідження)  $N_0$  однотипних об'єктів (елементів) випробування вважаються закінченими у випадку відмови всіх досліджуваних об'єктів (елементів)  $n = N_0$ . При цьому замість елементів, що відмовили нові (або відремонтовані) елементи не встановлюються.

**Ймовірність безвідмовної роботи**) – це ймовірність того, що в заданих умовах експлуатації протягом певного проміжку часу  $t$  (заданого напрацювання) не виникатиме відмова досліджуваних об'єктів (елементів).

$$P(t) = P(T) \text{ де } T > t, \quad (1.3)$$

де  $t$  – проміжок часу, протягом якого визначається ймовірність безвідмовної роботи;  $T$  – час роботи об'єктів (елементів), які досліджуються до першої відмови.

Іноді величину  $P(t)$  називають функцією надійності та ще й коефіцієнтом безвідмовності.

Математично ймовірність безвідмовної роботи може бути записана так:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt, \quad (1.4)$$

де  $F(t)$  – функція розподілу напрацювання до відмови (при  $t = \infty$   $\int_0^t f(t) dt = 1$ ).

Експериментально ймовірність визначається з виразу

$$P(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \left( N_0 - \sum_{i=1}^{\Delta t, t} n_i \right) / N_0, \quad (1.5)$$

де  $N_0$  – число однотипних зразків обладнання, за яким виконували спостереження протягом часу  $t$ ;  $\sum_{i=1}^{\Delta t, t} n_i$  або  $n(t)$  - число елементів, що відмовили протягом інтервалу часу  $t$ ;  $t$  - термін часу, для якого визначається ймовірність безвідмовної роботи.

$\Delta t$  – прийнята тривалість інтервалу часу ;  $t$  – термін часу, для якого визначається ймовірність безвідмовної роботи.





На практиці користуються формулою, що дозволяє врахувати результати статистичних спостережень за відмовами

$$P(t) = [N_0 - n(\Delta t)] / N_0, \quad (1.6)$$

де  $N_0$  – число однотипних зразків (об'єктів) на початку періоду випробувань (досліджень)  $t$ ;  $n(t)$  – число елементів, що відмовили протягом часу  $t$ .

Параметр  $P(t)$  означає тільки статистичну оцінку, а не є самим параметром. Це пов'язано з тим, що для отримання значення параметра необхідно мати досить великий об'єм вибірки  $N_0 \rightarrow \infty$ . Слід зауважити, що числове значення  $P(t) \leq 1$ .

**Імовірністю відмови  $Q(t)$**  називають вірогідність того, що при певних умовах експлуатації протягом заданого інтервалу часу  $T$  виникає хоча б одна відмова

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.7)$$

Відмова та безвідмова робота є протилежними подіями.

Для практичних розрахунків користуються формулою, що дозволяє скористатися результатами спостереження:

$$Q(t)^* = \frac{n_1}{N_0}. \quad (1.8)$$

**Частота відмов  $a(t)$**  – це співвідношення числа елементів (об'єктів) які відмовили за одиницю часу до числа початково прийнятих для дослідження елементів (об'єктів)

$$a^*(t) = \frac{n_{\Delta t}}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.9)$$

де  $n_{\Delta t}$  – число відмовлених елементів (об'єктів) у інтервалі часу  $\Delta t$ ;  $\Delta t$  – величина часових інтервалів, на які розбивають весь період спостережень  $t$ .

Для зручності розрахунків величину  $\Delta t$  приймають рівною одному року для споруд і об'єктів, та рівним одному місяцю – для обладнання (наприклад, для насосів  $\Delta t=500$  годин).

У той же час період спостережень  $t$  може бути прийнятий таким, що дорівнює терміну служби об'єкта. При цьому, протягом терміну служби на кожному відрізу  $\Delta t$  може виявитися своя частота відмов  $a(t)$ . Відповідно до визначення частота відмов є



щільністю розподілу часу роботи елемента (об`єкта) до першої відмови:

$$a(t) = f(t) = -pB(t) = QB(t), \quad (1.10)$$

і навпаки:

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt; \quad p(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt. \quad (1.11)$$

Частота відмов  $a(t)$  має розмірність, зворотну до часу 1/рік; 1/міс.

**Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$**  – співвідношення числа відмовлених елементів (об`єктів) за одиницю часу до середнього числа елементів, які справно працювали протягом розглянутого відрізка часу  $\Delta t$  :

$$\lambda(t) = \frac{n_{\Delta t}}{N_{cp, \Delta t}}, \quad (1.12)$$

$$N_{cp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \quad (1.13)$$

де  $N_i$  та  $N_{i+1}$  – число елементів (об`єктів), які справно працювали відповідно на початку та наприкінці відрізка часу  $\Delta t$ .

Інтенсивність відмов також має розмірність, що обернена до часу  $t$  1/рік; шт/рік.

В аналітичному вигляді інтенсивність відмов являє собою умовну ймовірність відмови елементів (об`єктів) в інтервалі часу  $(t + \Delta t)$  при умові, що до моменту  $t$  елементи (об`єкти) працювали безвідмовно:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = -\frac{dP}{dtP(t)}, \quad (1.14)$$

$$\lambda(t) dt = \frac{dP}{P(t)}; \quad \int_0^t \lambda(t) dt = -\ln P(t). \quad (1.15)$$

Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  та ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) \text{ пов`язані між собою залежністю: } P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt};$$

$$\text{якщо } =const, \text{ то } P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.16)$$

Таким чином, функція надійності підпадає під експоненціальне розподілення. Тобто, чим більше термін експлуатації елемента



(об'єкта), тим нижче його надійність. При цьому, ймовірність появи відмови протягом часу  $t$  визначається законом Пуассона:

$$P_m(t) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1.17)$$

де  $m=1,2,3 \dots n$ .

При  $m=0$  отримаємо ймовірність безвідмовної роботи виду:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.18)$$

**Середнє напрацювання до першої відмови** або середній термін безвідмовної роботи  $T_{cp}$  :

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.19)$$

На практиці величину  $T_{cp}$  можна визначити за формулою:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (1.20)$$

де  $t_i$  – термін безвідмовної роботи  $i$ -го елемента (об'єкта) до першої відмови.

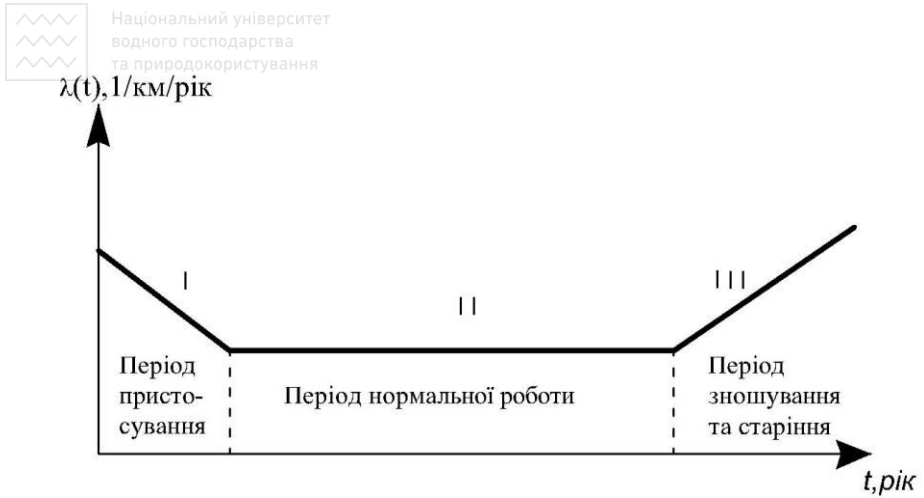
Кількісними характеристиками надійності відновлюваних елементів є параметр потоку відмов і напрацювання на відмову.

**Параметром потоку відмов  $\omega(t)$**  називають співвідношення відмовлених елементів в одиницю часу до загального числа елементів (об'єктів) при умові, що всі відмовлені елементи будуть замінені на справні.

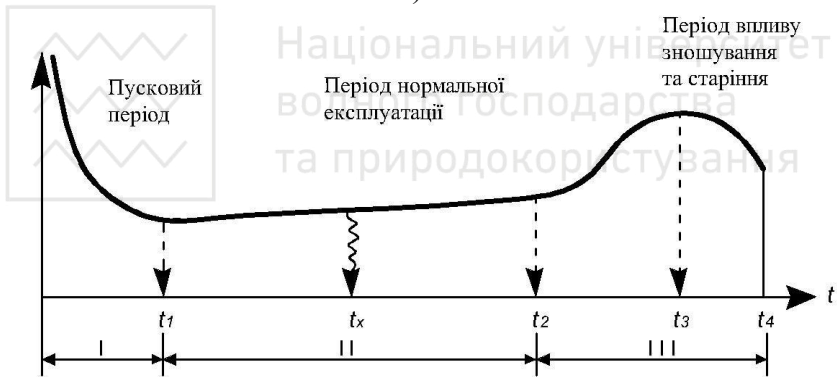
$$\omega(t) = \frac{n_{\Delta t}}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.21)$$

де  $n_{\Delta t}$  – число елементів, що відмовили в інтервалі часу  $\Delta t$ ;  $N_{\Delta t}$  – число випробувальних елементів;  $\Delta t$  – величина інтервалу часу.

У практиці оцінки надійності систем та елементів величину  $\omega(t)$  називають **середньою частотою відмов**. У випадку коли  $\lambda(t)=const$ , то можна вважати що  $\omega(t) = \lambda(t)$ . Тому, на практиці, як правило, ці поняття ототожнюють. Тим не менше, у практиці проведення розрахунків поняття “інтенсивність відмов” застосовують і для відновлювальних виробів замість параметра “потоку відмов”. Багаторічні дослідження та великий обсяг дослідних даних показує, що функція  $\lambda(t)$  має три характерні періоди змінюваності (рис.1.3).



а)



б)

Рис. 1.3. Графік змінюваності параметра інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  від терміну експлуатації трубопроводу : а) за даними Найманова А.Я. ; б) за даними Блозерова М.П.

Перший період (від 0 до  $T_n$ ), називають *періодом пристосування*, або *періодом пуско-наладки*. У цей період відмовляють, як правило, ті елементи, що мають серйозні дефекти.

Інтенсивність відмов у цей період значна з тенденцією до швидкого спаду.



Другий період (від  $T_n$  до  $T_{zn}$ ) називають *періодом нормальної роботи*. Він характеризується відносно невеликим зростанням величини інтенсивності відмов із подальшою стабілізацією. Момент часу  $T_{zn}$  називають терміном початку старіння та зношування.

Третій період при  $t > T_{zn}$  є періодом *інтенсивного старіння* та зношування елементів.

Термін служби елементів повинен прийматися не більше ніж  $T_{zn}$ . Тоді, при відносно невеликій тривалості періоду пристосування можна вважати, що  $\lambda(t) = const$ .

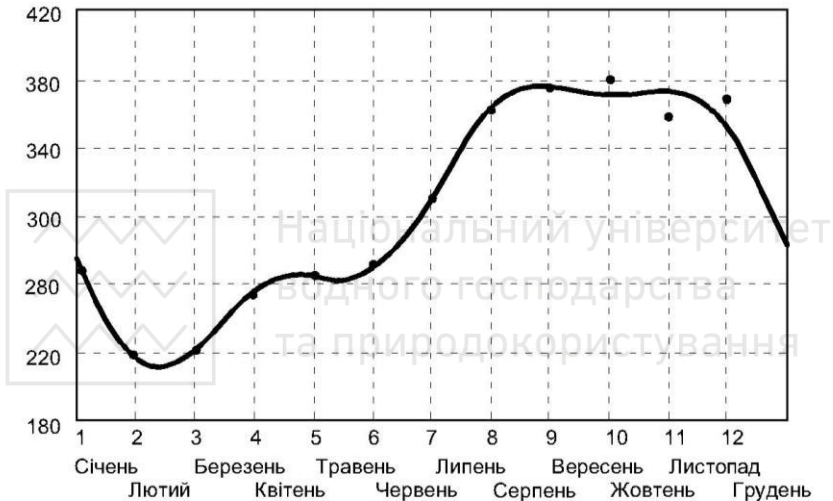


Рис. 1.4. Діаграма інтенсивності відмов у водопровідній мережі м. Харкова (за результатами досліджень Петросова В.А. 1993-2000 рр.)

Тобто,  $\omega(t) = \lambda(t) = const$ . Таким чином, можна знайти імовірність того, що за термін  $t$  виникне  $m$  відмов (за законом Пуассона):

$$P_m(t) = \frac{(\omega \cdot t)^m}{m!} \cdot e^{-\omega t}, \quad (1.22)$$

$m = 0, 1, 2, \dots, n$

При  $m=0$  отримо

$$P(t) = e^{-\omega t}. \quad (1.23)$$

**Напрацювання на відмову**  $t_{cp}$  називають середнє значення терміну роботи елементів (об'єктів) між сусідніми відмовами



$$t_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (1.24)$$

де  $t_i$  – термін справної роботи елементів (об'єктів) між  $(i-1)$  та  $i$ -ою відмовами;  $n$  – число відмов протягом деякого терміну часу  $t$  (період спостережень).

З визначення витікає, що напрацювання на відмову є середнім терміном між сусідніми відмовами й дорівнює величині, оберненій частоті відмов:

$$t_{cp} = \frac{1}{\omega(t)}, \quad \text{при цьому} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} t_{cp} = T_{cp}. \quad (1.25)$$

Тобто, напрацювання на відмову наближається до середнього терміну безвідмовної роботи  $T_{cp}$ .

В якості **параметрів ремонтпридатності** використовують: імовірність відновлення, імовірність невідновлення, частоту відновлення, інтенсивність відновлення, термін відновлення.

**Імовірність відновлення  $F_e(t)$**  – це вірогідність того, що в заданих умовах експлуатації відновлення елемента (об'єкта) буде завершено протягом певного (нормативного) інтервалу часу  $t$ .

Звідси витікає, що термін часу  $\tau$  від початку виявлення несправності до моменту її усунення повинен бути меншим або дорівнювати  $t$ .

Тобто

$$F(t) = P(t \leq \tau). \quad (1.26)$$

**Ймовірність невідновлення  $V_e(t)$**  протягом часу  $t$

$$V_e(t) = 1 - F_e(t) = P(\tau \geq t). \quad (1.27)$$

На практиці числові значення цих параметрів вираховують за результатами спостереження або випробування:

$$F_e(t) = \frac{n_{e,i}}{N_{om}}; \quad V_e(t) = \frac{N_{om} - n_{e,t}}{N_{om}}, \quad (1.28)$$

де  $N_{om}$  – кількість однотипних елементів (об'єктів), що підлягають ремонту протягом терміну часу  $t$ ;  $n_{e,t}$  – число відремонтованих елементів (об'єктів) протягом часу  $t$ .

**Частота відновлення  $\nu(t)$**  є щільністю розподілу тривалості ремонту елементів (об'єктів) до відновлення.



На практиці за результатами випробувань її визначають за формулою:

$$v'(t) = \frac{n_{e,\Delta t}}{N_{om} \cdot \Delta t} \quad (1.29)$$

Теоретично

$$f_e(t) = \frac{dF_e}{dt} \quad (1.30)$$

де  $n_{e\Delta t}$  – число відновлених елементів (об'єктів) протягом інтервалу часу  $\Delta t$ ;  $\Delta t$  – величина часових інтервалів, на які розділено період ремонту елементів (об'єктів).

**Інтенсивність відновлення (швидкість)  $\mu(t)$ .**

$$\mu(t) = \frac{n_{e,\Delta t}}{N_{om,sp} \cdot \Delta t} \quad (1.31)$$

де  $N_{om,sp}$  – середнє число елементів (об'єктів), що підлягають ремонту в межах інтервалу часу  $\Delta t$ ;  $N_i$  і  $N_{i+1}$  – число елементів, які придатні до ремонту на початку і вкінці інтервала  $\Delta t$ ;

$$N_{om,sp} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2} \quad (1.32)$$

Теоретична залежність виглядає так:

$$\mu(t) = \frac{f_e(t)}{1 - F_e(t)} = \frac{a \cdot F_e}{dt \cdot (1 - F_e)} \quad (1.33)$$

Розмірність  $\mu(t)$  1/год; 1/с.

Імовірність відновлення пов'язана з  $\mu$  таким співвідношенням:

$$F_e(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt} \quad ; \quad (1.34)$$

$$v(t) = \mu(t) \cdot e^{-\int_0^t \mu(t) dt} \quad (1.35)$$

Таким чином, величину  $\mu(t)$  прийнято вважати за *основний показник ремонтпридатності* елементів (об'єктів) технічних систем.

**Середній термін відновлення  $T_e$**  являє собою середнє арифметичне значення величин тривалості ремонту  $t_e$ .



$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_{om}} t_{\epsilon i}}{N_{om}}, \quad (1.36)$$

де  $t_{\epsilon i}$  – тривалість відновлення  $i$ -го елемента.

**Комплексний показник** характеризує одночасно не менше двох основних властивостей, що складають надійність.

**Коефіцієнт готовності  $K_2$**  (для систем, які допускають перерви у своїй роботі) – імовірність того, що об'єкт буде знаходитись в працездатному стані в любий, довільний момент часу  $t$  із початку експлуатації, крім періодів, коли робота об'єкта не передбачається

$$K_2 = \frac{t_{cp.}}{t_{cp.} + T_{\epsilon}}, \quad (1.37)$$

де  $t_{cp.}$  – середній термін між відмовами (напрацювання на відмову);  $T_{\epsilon}$  – середній термін відновлення.

$$\text{Коефіцієнт простою } K_n = 1 - K_2 = \frac{T_{\epsilon}}{t_{cp.} + T_{\epsilon}}. \quad (1.38)$$

У процесі практичних розрахунків можна застосувати такі формули:

$$K_2' = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\epsilon i}}; \quad K_n' = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\epsilon i}}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\epsilon i}}, \quad (1.39)$$

де  $t_i$  – тривалість справної роботи об'єкта між  $i$ -м та  $(i+1)$  відмовами;  $t_{\epsilon i}$  – тривалість відновлення об'єкта після  $i$ -ї відмови.

Вище наведені параметри дозволяють оцінювати як надійність об'єкта, так і рівень його експлуатації (ремонту).

## 1.5. Резервування у технічних системах

Технічні системи складаються з ряду елементів, з'єднаних між собою відповідним чином. Поняття «елементи» й «системи» є відносними. Наприклад, відцентровий насос може розглядатися як технічна система, яка складається з механічної й електричної





частини, кожна з яких може у свою чергу поділятися на елементи (деталі). У той же час у насосній станції насос є елементом, а в складі системи водопостачання окремим елементом може вважатися насосна станція в цілому.

Система може складатися з однакових або різних елементів. В ній елементи з'єднуються послідовно або паралельно. Експериментально, шляхом випробувань, звичайно, визначаються показники надійності елементів. Сутність резервування полягає у введенні в систему додаткових елементів для забезпечення безвідмовності об'єкта в цілому, при недостатньо надійних елементах. Однак можливе резервування й без уведення додаткових елементів. Наприклад, тимчасове резервування з використанням резервів часу, функціональне – з використанням здатності елементів виконувати додаткові функції, або перерозподіляти функції. Інформаційне резервування пов'язане з використанням резервів інформації. При загальному резервуванні підвищення надійності досягається шляхом резервування системи в цілому, а при роздільному - окремих елементів системи.

**Кратністю резервування** називають співвідношення числа резервних елементів до числа основних (робочих) і позначають  $m$ . Це число може бути цілим або дробовим. Наприклад,  $m = 4/2$  означає кількість резервних елементів дорівнює 4, кількість основних – 2, а загальна кількість елементів – 6. Якщо скоротити  $4/2=2$ , то отримаємо резервування із цілою кратністю, при якому число резервних елементів дорівнює 2, а число основних – 1, загальне число елементів – 3.

За способом включення резервування буває **постійним, тимчасовим, з резервом заміщення**, при якому резервні елементи заміщають основні після їхньої відмови. Спосіб заміщення передбачає, що резервні елементи можуть бути навантаженими (в тому ж режимі, що й основні); полегшено навантаженими (вони менше навантажені, ніж робочі, основні елементи); не навантажені взагалі (не мають навантаження до моменту їхнього включення в роботу).

Показники надійності резервованих систем визначаються за такою схемою:

- складна система розкладається на однотипні елементи, і для цих елементів визначаються параметри надійності;



- виділяють елементи, які функціонально впливають на надійність системи в процесі роботи;
- складають структурну схему системи;
- надають формулювання відмови системи;
- складається таблиця розрахунків інтенсивності відмов  $\lambda(t)$ ;
- складається таблиця розрахунків надійності  $P(t)$  залежно від часу безперервної роботи й резерву;
- визначається можливий час безвідмовної роботи  $T_{cp}$ ;
- отримані параметри надійності порівнюються з необхідними за нормами.

У невідновлюваних системах із послідовним з'єднанням елементів ймовірність безвідмовної роботи залежить від добутку ймовірностей безвідмовної роботи кожного елемента.

При цьому, інтенсивності відмов і ремонтів дорівнюють сумі інтенсивностей ремонтів та інтенсивностей відмов усіх складових елементів

$$P_c(t) = P_1(t) \times P_2(t) \times P_3(t) \dots \times P_n(t), \quad (1.40)$$

$$\text{при } \lambda = \text{const } P(t) = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t} \times e^{-\lambda_3 t} \times \dots \times e^{-\lambda_n t} = e^{-\lambda_c t}, \quad (1.41)$$

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = \sum_1^n \lambda_i, \quad (1.42)$$

$$\mu_c = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots + \mu_n = \sum_1^n \mu_i. \quad (1.43)$$

Загальна ймовірність безвідмовної роботи системи буде менша за ймовірність безвідмовної роботи кожного окремого елемента, у зв'язку з тим що  $P_i < 1$ , а  $\prod_i^n P_i < P_i$  завжди. Відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи.

Середній термін безвідмовної роботи системи:

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c}. \quad (1.44)$$

Для систем із високою надійністю параметри надійності можна визначати за наближеними спрощеними формулами:

$$P_c(t) \approx 1 - \lambda_c \cdot t; \quad T_c \approx 1/\lambda_c; \quad a(t) = \lambda_c \cdot (1 - \lambda_c \cdot t). \quad (1.45)$$



У системах із паралельним з'єднанням елементів розрахунок проводиться за формулами, вигляд яких залежить від способу резервування. Імовірність безвідмовної роботи системи з постійно включеним резервом

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t). \quad (1.46)$$

У той же час ймовірність відмови:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t). \quad (1.47)$$

Тоді ймовірність системи з паралельно з'єднаних елементів через ймовірність кожного з них:

$$P_c(t) = 1 - [1 - P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t)]^{m+1} = 1 - \left[ 1 - \prod_1^n P(t) \right]^{m+1}, \quad (1.48)$$

де  $n$  – число елементів в складі основної (резервної) системи;  $m$  – кратність резервування (число резервних систем).

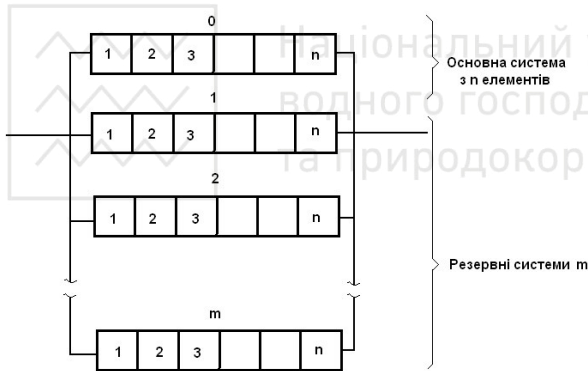


Рис. 1.5. Технічна система з спільним резервуванням при постійно включеному резерві: 0 – основна система; 1, 2, ..., m – резервні системи ( $i = 1 \dots n$  – число елементів)

Чим вища кратність резервування, тим вище ймовірність безвідмовної роботи системи, тобто її надійність. Спільна надійність системи вище надійності будь-якого з окремих елементів. У випадку експоненціального закону розподілу показників надійності, коли  $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , то вираз спрощується:

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda_c t}]^{m+1}, \quad (1.49)$$

$$T_{cp,0} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1} = T_{cp,0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}, \quad (1.50)$$



де  $\lambda_0(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i$  – інтенсивність відмов не резервованої (основної)

системи або будь-якої з  $m$  резервних систем, інтенсивність відмов яких однакова  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n$ ;  $T_{cp.0}$  – середній термін безвідмовної роботи нерезервованої (основної) системи або будь-якої з  $m$  резервних систем.

У разі резервування нерівнонадійних елементів:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=0}^m q_i(t) = 1 - \prod_1^m [1 - P_i(t)]. \quad (1.51)$$

Для системи з роздільним резервуванням із цілою кратністю й постійно включеним резервом.

$$P_c(t) = \prod_1^n \{1 - [1 - P_i(t)]^{m_i+1}\}, \quad (1.52)$$

де  $P_i(t)$  – імовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента основної системи;  $m_i$  – кратність резервування  $i$ -го елемента;  $n$  – число елементів у складі основної системи.

У системах з експоненціальним законом розподілу параметрів надійності:

$$P_c(t) = \prod_1^n \{1 - [e^{-\lambda_i t}]^{m_i+1}\}. \quad (1.53)$$

У разі рівнонадійних елементів та однакової кратності резервування:

$$P_c(t) = \left\{1 - [1 - e^{-\lambda_i t}]^{m+1}\right\}^n, \quad (1.54)$$

$$T_{cp.c} = \frac{(n-1)!}{\lambda_c \cdot (m+1)} \cdot \sum_{i=0}^m \frac{1}{v_i \cdot (v_i+1) \cdot \dots \cdot (v_i+n-1)}, \quad (1.55)$$

де 
$$v_i = \frac{(i+1)}{m+1}, \quad (1.56)$$

для  $i = 0$   $v_0 = \frac{1}{m+1}$ ; для  $i = 1$   $v_1 = \frac{2}{m+1}$

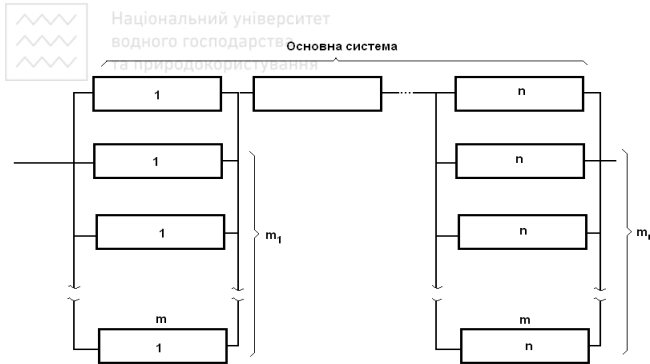


Рис. 1.6. Технічна система із роздільним резервуванням з цілою кратністю і з постійно включеним резервом

У системах з спільним резервуванням заміною, з цілою кратністю ймовірність безвідмовної роботи

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \sum_{i=0}^m \left[ \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!} \right], \quad (1.57)$$

$$T_{cp.c} = T_{cp.0} \cdot (m+1), \quad (1.58)$$

де  $\lambda_0, T_{cp.0}$  – відповідно параметри основної (нерезервованої) системи.

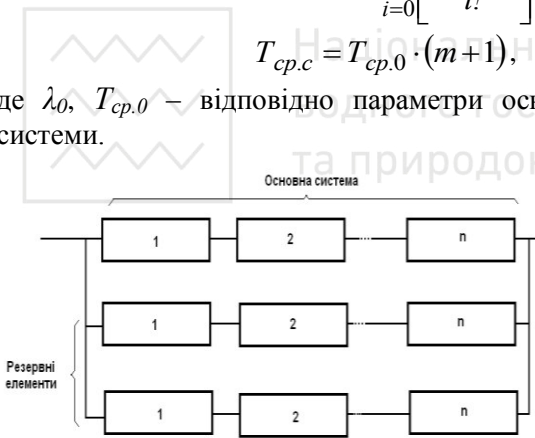


Рис. 1.7. Логічна схема системи з спільним резервуванням заміною та цілою кратністю

Для системи з роздільним резервуванням заміною з цілою кратністю ймовірність безвідмовної роботи

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (1.59)$$

Для визначення показників надійності відновлюваних систем необхідно врахувати не тільки щільність розподілу часу безвідмовної роботи, але й часу відновлення. Для найпростішої



дубльованої системи ( $m=1$ ) та в разі експоненціального розподілення вище вказаних термінів:

$$P_c(t) \approx e^{-\frac{\gamma t}{T_1}} \approx e^{-\frac{\lambda^2 t}{\mu}}, \quad (1.60)$$

де  $\gamma = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (1.61); \quad T_1 = \frac{1}{\lambda} \quad (1.62)$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов основної або резервної системи.

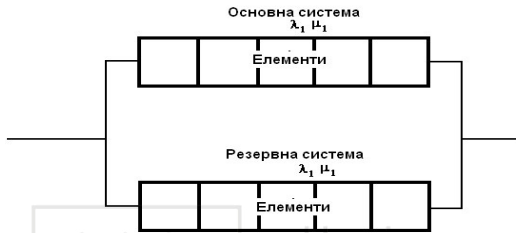


Рис.1.8. Логічно-структурна схема дубльованої системи з відновлюваних елементів ( $m = 1$ )

Замість методів теорії ймовірності, які були застосовані раніше в даному випадку більш придатними є методи теорії масового обслуговування, з використанням теорії графів. Теорія масового обслуговування (теорія марківських випадкових процесів) цілком підходить для опису роботи комунальних систем міст. У таких системах виділяють наступні основні параметри:

- число каналів обслуговування ( $r$ ). Для об'єктів комунального господарства під поняттям каналу обслуговування слід розуміти ремонтну бригаду робітників із всіма приналежними їй механізмами і матеріалами для проведення ремонту.

- інтенсивність обслуговування заявки на кожний канал. Яка представляє собою інтенсивність ремонтів  $\mu(t)$ ;

- інтенсивність надходження заявок в систему масового обслуговування. Для комунальних систем вона представлена інтенсивністю відмов ( $\lambda$ ).

- кількість елементів у складі системи ( $n$ ).

При використанні теорії систем масового обслуговування визначення параметрів надійності слід проводити в наступній послідовності:

- 1) Складають рівняння масового обслуговування;
- 2) Вибирають початкові умови вирішення задачі;



Визначають імовірності застати систему в справному стані, а також імовірності безвідмовної роботи.

4) Визначаються (у разі необхідності) інші параметри надійності за методикою, що була раніше наведена.

Слід відмітити, що ймовірність безвідмовної роботи більш придатна для застосування в разі оцінки надійності невідновлюваних систем. Для відновлюваних систем, якими безперечно є системи ВІВ рекомендується використовувати більш складний параметр – показник якості функціонування.

Так, для розподільних систем водопровідної та водовідвідної мережі, мережі газопостачання в якості характеристики якості функціонування слід приймати фактичну годинну витрату води (стічної води). У такому випадку, кожному стану мережі  $\bar{x}(t)$  відповідає максимальна годинна витрата води (стічної води, або газу), або через неї  $\Phi_x(t)$ . Ця витрата залежить не тільки від стану системи, але й дає чисельну характеристику ступеню виконання задачі. При різних станах системи відключаються різні кількості споживачів і сумарна недоподача системою води визначає зниження показника якості функціонування. Якщо позначити розрахункову витрату води через справну систему через  $Q_0$ , недоподачу відключеним водоспоживачам у стані  $\bar{x}(t)$  через  $\Delta Q_x$ , тоді вираз показника якості функціонування буде мати такий вигляд:

$$\Phi_x(t) = Q_0 - \Delta Q_x. \quad (1.63)$$

Показник надійності системи  $R_c(t)$  являє собою співвідношення показника якості реальної системи  $\Phi_x(t)$  до показника якості функціонування ідеальної системи (повністю справної) системи  $\Phi_0(t)$ .

$$R_c(t) = \frac{\Phi_x(t)}{\Phi_0(t)} = \frac{Q_0 - \Delta Q_x}{Q_0} \leq 1. \quad (1.64)$$

Аналогічно, можна представити показник якості функціонування за величиною напору води й відповідності його заданим значенням, а в подальшому вважати його показником надійності.

У системах ВІВ аналогом показника надійності системи можуть вважатися коефіцієнти забезпеченості витрати  $\alpha$  і напору  $\beta$ .

$$\alpha_Q = \frac{Q_{av}}{Q_p}, \quad (1.65); \quad \beta_H = \frac{H_{av}}{H_p}, \quad (1.66)$$



де  $Q_p$  і  $H_p$  – витрата й напір у системі при розрахунковому режимі роботи; де  $Q_{ав.}$  і  $H_{ав.}$  витрата й напір води при аварійному режимі.

## 1.6. Задачі й принципи забезпечення надійності

Наука про надійність базується на фундаментальних математичних та природничих науках – теорії ймовірностей, фізико-хімічній механіці, в тому числі теорії тертя та зношування, розділах динаміки та міцності машин і механізмів, теорії масового обслуговування, теорія Марківських процесів. У теорії надійності залучені ідеї автоматичного регулювання та кібернетики, розвиваються положення теорії технологічних процесів і діагностики. Особливе значення для науки надійності має питання про застосування математичного апарата та залучення вже розроблених або створених на запити практики нових методів, що дають змогу оцінити та прогнозувати надійність об'єктів, виробів і складних технічних систем. Так, на основі теорії ймовірностей та математичної статистики, а також суміжних із ними дисциплін створені й розробляються спеціальні методи розрахунку, які пов'язані з основними аспектами проблеми надійності технологічних систем і окремих об'єктів, чи виробів.

Головним завданням при встановленні надійності об'єктів і систем є вивчення тих процесів, які призводять до зміни початкових показників їх якості. Ці процеси, підпорядковуючись певним фізичним закономірностям, мають стохастичну природу, вступають у різноманітні взаємодії, виявляють складний зв'язок зі зміною вихідних параметрів виробу. Розкриття цих зв'язків можливе на основі функціональних залежностей із залученням теорії ймовірностей та теорії випадкових процесів, методів оптимізації, теорії інформації, математичної логіки та інших розділів математики. Теоретичною основою науки про надійність можуть бути результати досліджень природничих наук, що вивчають фізико-хімічні процеси руйнування, старіння та зміни властивостей матеріалів, з яких виготовлені технологічні системи та їхні елементи, чи які потрібні для їхнього функціонування (вода, стічна вода тощо). З огляду на необхідність вивчення змін, що відбуваються в матеріалах та їхніх поверхових шарах, виникла галузь теорії надійності під назвою фізика відмов. Фізика відмов





вивчає незворотні процеси, що призводять до втрати матеріалами своїх початкових властивостей при експлуатації виробів.

Підвищення надійності систем може бути досягнуто двома шляхами:

1) підвищенням надійності і якості елементів, з яких складається система (наприклад, використання більш якісних труб, матеріалів, устаткування, покращення якості будівельно-монтажних робіт, підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу тощо). Цей шлях найбільш оптимальний.

2) резервування (дублювання) елементів систем. Це дозволяє одержати систему більше надійну, ніж надійність її складових елементів.

Обґрунтована довіра до працюючої системи й чисельна оцінка її надійності можуть базуватися виключно на даних досвіду фактичної роботи подібних же систем або їхніх складових елементів.

Порушення роботи системи, що перешкоджають нормальному виконанню її функцій, обумовлюються різними випадковими подіями. Єдиним шляхом оцінки можливості появи таких подій, закономірностей їхнього виникнення й повторення є збір, вивчення й обробка статистичних відомостей про роботу систем, що діють (*пасивний експеримент*). Для окремих елементів у складі систем характеристики їхні поведінки в роботі визначають зазвичай шляхом спеціально поставлених заводських випробувань (*активний експеримент*). Матеріали, отримані в результаті спостережень у натурних умовах, або в наслідок проведення відповідних експериментів, обробляються методами математичної статистики, і дозволяють установити чисельну вірогідність виникнення тих випадкових подій, які можуть привести до порушення нормального функціонування окремих елементів, і виробів, а отже, і системи в цілому.

Усі оцінки надійності й вхідних у це поняття окремих властивостей та чисельних показників мають імовірнісний характер. Базуючись на даних фактичного досвіду роботи аналогічних об'єктів (елементів), ми можемо визначити вірогідність часу (тривалість періоду) їхньої безвідмовної роботи, вірогідне середнє число відмов у заданий проміжок часу й інші чисельні показники, пов'язані з оцінкою надійності. Чисельні показники вірогідності випадкових подій вимірюються в долях одиниці або у



відсотках. Вірогідність, що дорівнює одиниці, характеризує достовірну подію, тобто таку, яка неодмінно відбудеться.

Неможливо розглядати вірогідність настання будь-яких випадкових подій без співвіднесення їх до будь-якого кінцевого проміжку часу.

Залежно від характеру споживання води або відведення стічних вод надійність систем може бути обґрунтована як економічними міркуваннями, так і необхідністю забезпечення належного санітарного стану, рівня побутового обслуговування населення та ін. В усіх випадках надійність системи повинна забезпечувати безпеку людей від можливих наслідків порушення функцій водозабезпеченості (вибухи, пожежі й т. п.).

Забезпечення необхідної (заданої) надійності системи повинне передбачатися: у процесі її проектування й розрахунку за сучасними методиками, у процесі виготовлення (використання надійних матеріалів і устаткування), у процесі спорудження системи (висока якість будівельно-монтажних робіт), у процесі експлуатації — шляхом необхідної організації аварійно-відновної служби, планово-запобіжних ремонтів і високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Слід мати на увазі, що підвищення надійності системи завжди призводить до зростання матеріальних витрат, а тому повинно виправдовуватися зниженням матеріальних збитків, що викликаються її можливими відмовами. Сучасний рівень розвитку техніки дає змогу досягти майже будь-яких показників якості, у тому числі показників надійності виробів, споруд, об'єктів чи то технічних систем.

Використовуючи техніко-економічні (оптимізаційні) розрахунки, можна визначити оптимальні об'єми витрат на забезпечення надійності систем ВІВ. У кожному конкретному випадку досягнутий рівень надійності треба оцінювати насамперед з **економічної** точки зору. Різноманітні варіанти досягнення потрібного рівня надійності слід порівнювати, виходячи з умови найбільшого сумарного економічного ефекту, з урахуванням затрат на виготовлення нового об'єкта, у тому числі на його проектування, випробування, налагодження, транспортування окремих складових елементів до місця спорудження (зведення), та інші витрати, а також затрати на експлуатацію, у тому числі на технічне обслуговування, ремонт, паливо, оливу, мастило тощо. З іншого боку, робота будь-якого

об'єкту дає позитивний економічний ефект (прибуток) залежно від його цільового призначення.

Затрати на експлуатацію у функції часу мають тенденції до зростання, бо старіння окремих елементів об'єкту призводить до необхідності вкладати дедалі більші кошти для відновлення втрачених властивостей. Прибуток у функції часу спочатку зростає, а потім починає знижуватися, оскільки часте виникнення простоїв об'єкту під час ремонту та технічного обслуговування знижують його продуктивність

$$B(t) = B_e + B_e(t) + B_p(t), \quad (1.67)$$

де  $B_e$  – затрати на виготовлення виробу (спорудження об'єкту);  $B_e(t)$  – експлуатаційні затрати у функції часу;  $B_p(t)$  – дохід від роботи об'єкту у функції часу.

Як видно із графіка (рис. 1.3), величина  $B_p(t)$  (дохід) має максимум і два рази перетинає вісь абсцис.

$$B_e + B_e(t) = B_p(t). \quad (1.68)$$

Період часу точка  $A$  функції  $B(t)$  називається терміном окупності ( $t = T_{ок}$ ).

Фактично, це термін, протягом якого об'єкт відшкодував матеріальні затрати, вкладені в нього при виготовленні та експлуатації за певний період. Із цього моменту прибуток почне зменшуватись, і настане час, коли об'єкт почне приносити збитки.

Загалом, чим менший термін окупності та чим більший граничний час експлуатації  $T_{пр}$ , тим більш надійна споруда. Слід прагнути до мінімального значення коефіцієнта  $K_e$

$$K_e = \frac{B_e + B_e(t)}{T_e}, \quad (1.69)$$

де  $T_e$  – час експлуатації.

Досягається це за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між сферою виробництва, а також сферою експлуатації.

За інших однакових умов здешевлення вартості спорудження об'єкту приводить до збільшення витрати на їхню експлуатацію.

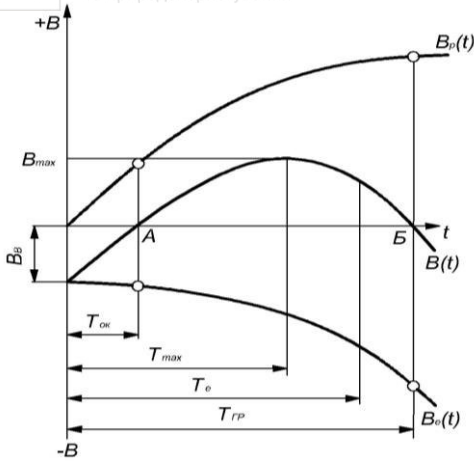


Рис.1.9. Зміна економічної ефективності в часі:  $B(t)$  – функція мінюваності доходу;  $B_e$  – затрати на виготовлення (зведення) об'єкту;  $B_e(t)$  – експлуатаційні затрати у функції часу;  $B_p(t)$  – дохід від роботи (функціонування) об'єкту у функції часу.

Співвідношення між вартістю виготовлення (спорудження) об'єкту, виробу чи технологічної системи, а також експлуатацією характеризується коефіцієнтом експлуатаційних витрат

$$K_{\text{еум}} = \frac{B_e}{B_e + B_e(t)} < 1. \quad (1.70)$$

У зв'язку з тим що вища надійність, як правило, досягається за рахунок додаткових затрат, то часто використовують поняття *ціни надійності* -  $B_n$ . Ці змінні затрати на виготовлення виробу, які обумовлюються встановленими вимогами надійності. Для прогнозування затрат на підвищення надійності в деяких випадках застосовують метод порівняння із *прототипом* за результатами обробки дослідних даних про ціну надійності

$$B_n = B_{n.a.} \cdot \left( \frac{T_{\text{від}}^{np}}{T_{\text{від}}^n} \right)^a, \quad (1.71)$$

де  $B_{n.a.}$  – ціна надійності аналога чи прототипу;

$T_{\text{від}}^{np}$  – напрацювання на відмову об'єкту (елементу, виробу), що запроєктований або технологічної системи;

$T_{\text{від}}^n$  – напрацювання на відмову (середній термін служби) прототипу;  $a$  – емпіричний показник, що характеризує рівень



підвищення надійності виробу, об'єкту, технологічної системи  
(показник ступеня  $a = 0,5 \dots 1,5$ )

### Контрольні запитання і завдання

1. Що таке надійність системи, об'єкту, елемента?
2. Чим обумовлені необхідність та методи забезпечення надійності в інженерній практиці?
3. Охарактеризуйте поняття про «оптимальну надійність» системи.
4. Дайте визначення основним поняттям надійності систем та їх елементів.
5. Які показники економічної ефективності від впровадження заходів підвищення надійності систем.
6. Охарактеризуйте поняття «відмова».
7. На яких етапах створення та існування системи (об'єкту) передбачається забезпечення їх надійності?
8. Яка теоретична база науки про надійність систем?
9. З якими базовими і фаховими дисциплінами наука про надійність має тісні зв'язки?
10. Які є показники економічної ефективності від впровадження заходів підвищення надійності систем?
11. Які відомі види резервування технічних систем?
12. Що таке кратність резервування?
13. Як визначаються показники надійності для резервованої системи?



## 2. ЕКСПЕРИМЕНТ ТА СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 2.1. Поняття про експериментальні дослідження

Експеримент означає науково поставлений дослід, у процесі якого дослідник перевіряє реально або штучно ним викликане явище в точно врахованих умовах. Предметом експериментальних досліджень є: сили й крутні моменти; лінійні й кутові переміщення; швидкості й прискорення; частоти й фази коливань, у теорії надійності дослідженню підлягають випадкові величини (відмови, напрацювання), або їхні числові характеристики (параметри безвідмовності, ремонтпридатності, чи комплексні характеристики). У результаті проведення експериментів одержують статистичні дані. Методами реєстрації, опису й аналізу статистичних займається **математична статистика**.

При **активному** експерименті здійснюється цілеспрямоване втручання в досліджуваний процес. Об'єкт дослідження, на якому можливий активний експеримент, називається керованим.

Наприклад, випробування робочих елементів систем ВІВ (засувок, насосних агрегатів, водоочисних установок), лабораторні дослідження на лабораторних установках, на яких можна змінювати геометричні параметри, режими експлуатації, швидкісні режими тощо. При **пасивному** експерименті дослідник пасивно чекає природного прояву необхідних ефектів, наприклад, при оцінці надійності діючих систем водопостачання й водовідведення в робочому режимі їхньої експлуатації.

**Параметром (або критерієм)** оптимізації називають кількісну характеристику мети експериментального дослідження. Параметри оптимізації поділяються на: економічні, техніко-економічні, техніко-технологічні, ергономічні, естетичні та інші. Наприклад, як економічні параметри оптимізації використовується собівартість, прибуток; техніко-економічних – продуктивність, (потужність), надійність, довговічність; техніко-технологічних – фізико-механічні властивості, технічні характеристики, фізико-хімічні властивості.

**Фактором** називається незалежна змінна, що відповідає одному з можливих способів впливу на досліджуваний об'єкт. Обрані фактори повинні бути придатні для виміру з точністю приблизно на

порядок більшу, ніж вимір параметра оптимізації. Фактори бувають кількісні і якісні. Кількісні можна виміряти й виразити чисельно (наприклад, інтенсивність відмов, вірогідність безвідмовної роботи системи). Якісні фактори не відображаються іменованими числами (тип досліджуваної споруди, якість проектування).

На практиці завжди намагаються обрати такий фактор оптимізації, щоб він був один і не залежав від часу. Хоча це не стосується параметрів надійності, які завжди залежать від часу. Якщо все-таки пропонується досліджуваний процес характеризувати декількома вихідними параметрами оптимізації, то завжди доцільно досліджувати можливість зменшення їхнього числа. Для цього рекомендується використати кореляційний аналіз, за допомогою якого виявляється тіснота зв'язку між усіма можливими парами вихідних параметрів.

Характеристикою зв'язку між двома параметрами є величина «коефіцієнта парної кореляції». Розрахункове значення коефіцієнта кореляції порівнюється з табличним (при числі ступенів свободи  $f = N - 2$  і рівні значущості  $\alpha = 0,05$ ). Якщо виявиться, що розрахункове значення більше або дорівнює критичному (табличному), то гіпотеза про наявність тісного зв'язку між двома досліджуваними параметрами підтверджується й один із параметрів виключається. Переважно виключають той параметр, що складніше виміряти в процесі експерименту. Якщо між декількома параметрами оптимізації немає зв'язку, то їх можна об'єднати в один узагальнюючий параметр, за допомогою функції бажаності.

Після того як установлено перелік усіх впливових параметрів оптимізації, виявляють усі фактори, які можуть впливати на досліджуваний об'єкт або процес.

Фактори можна також поділити на: досліджувані, фактори на постійному рівні. Досліджувані фактори можуть мати кілька значень, які відповідають числу їхніх різних станів. Прийняття для експерименту кількісних і якісних станів фактора називають рівнями фактора. Фактори доцільно записувати в таблицю, у якій необхідно вказати найменування факторів, їхню розмірність, верхню, а також нижню границю варіювання. Для кожного експерименту необхідно задати інтервал варіювання факторів, яким називають половину різниці між більшим рівнем (верхньою границею) і меншим рівнем (нижньою границею) фактора.



Значення фактора в центрі області експерименту називається його основним рівнем, інтервал варіювання фізичного фактора повинен бути таким, щоб його величина приблизно на порядок перевищувала похибку установки й виміру величини  $x_j$ .

Спостереження в умовах експлуатації — це процес, який повинен забезпечувати отримання вірогідної інформації про надійність технологічних систем і обладнання. Вибір місця проведення спостережень має забезпечувати найхарактерніші умови експлуатації, та режими роботи, що передбачені в нормативно-технічній документації (НТД). Об'єктами спостереження є однотипні вироби (група виробів), що не мають конструктивної різниці та виготовлені за єдиною технологією. Збирати інформацію рекомендується з моменту початку випуску нової або модернізованої моделі виробу (спорудження нової технологічної системи).

Технічні завдання мають установлювати мету й завдання роботи, вказівки з організації робіт, номенклатуру показників надійності, що визначають умови експлуатації, за яких має здійснюватися збирання інформації, тривалість збирання інформації, порядок проходження інформації та звітність. Робочі методики мають містити спосіб збирання інформації; плани спостережень; вимоги до точності оцінки (допустимої похибки й довірчої ймовірності) показників, які підлягають визначенню; критерії відмов і граничних станів; класифікатор відмов за групами складності; форми обліку інформації; систему кодування інформації; порядок формування інформаційних масивів для статистичної обробки; формули для розрахунку показників надійності або алгоритму й програми обробки на ЕОМ; форми запису результатів обробки; порядок аналізу інформації та використання результатів.

Метою системи збирання й обробки інформації про надійність є конструктивне вдосконалення виробів, об'єктів (технологічних систем) для підвищення їхньої надійності, а також удосконалення правил експлуатації, технології виготовлення та ремонту, спрямованих на підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту й, як наслідок, зниження затрат на їхнє проведення.





Організація процесу збирання інформації про надійність має забезпечувати вірогідність, повноту, своєчасність, безперервність і регулярність, а також відповідати принципу однорідності та однаковості інформації. Вірогідність інформації — це властивість інформації забезпечувати істинні відомості про спостережувані вироби, об'єкти чи то технічні системи. Під повнотою інформації розуміють наявність таких відомостей, які потрібні для оцінювання та аналізу рівня надійності виробу з метою найповнішого розв'язання завдань, що виникають під час конструювання, виготовлення та експлуатації виробів, об'єктів чи технічних систем.

Своєчасність інформації забезпечує оперативність розробки організаційно-технічних заходів щодо підвищення рівня надійності окремого обладнання та технологічної системи в цілому. Висока точність оцінки надійності можлива лише за умови регулярного надходження інформації. Однорідність та однаковість інформації можуть бути досягнуті однаковими формами обліку. Існують дві найпоширеніші форми реєстрації інформації: табличний метод, метод реєстрації відмов за допомогою спеціальних карточок (перфокарт).

Залежно від мети й напрямків досліджень, що визначені в технічному завданні, можна використати такі способи збирання інформації: постійні спостереження в підконтрольній експлуатації; постійні спостереження в рядовій експлуатації; збирання даних на ремонтних підприємствах, разові обстеження, анкетування.

Постійні спостереження в підконтрольній експлуатації на опорних пунктах здійснюють в експлуатаційних підприємствах за робочими методиками. При цьому, передбачається участь наукових працівників при аналізі та розробці заходів щодо забезпечення й підвищення надійності. Постійні спостереження в рядовій експлуатації з періодичним відвідуванням науковими працівниками об'єктів спостереження здійснюють із розрахунку реєстрації в середньому однієї - двох відмов при кожному відвідуванні. При цьому під рядовою експлуатацією розуміють експлуатацію виробів із можливими відхиленнями від правил використання, технічного обслуговування та поточного ремонту виробів у звичайних експлуатаційних господарствах. Періодичні спостереження в рядовій експлуатації здійснюють не менш як тричі на рік.



При одноразових обстеженнях на ремонтних підприємствах інформацію збирають за певний період (квартал, півріччя, рік) залежно від виробничої програми підприємства. Збирання даних на ремонтних підприємствах здійснюють із використанням результатів дефектоскопії й за ресурсами виробів, їхніх складальних одиниць і деталей. Дані дефектоскопії використовують для того, щоб мати інформацію про ранні руйнування в короткі строки, а ресурсні — для розрахунку норм витрати запасних частин.

Разові обстеження та анкетування складаються з розсилання спеціальних листів опитування в експлуатаційні та ремонтні підприємства за встановленою робочою методикою формою. При цьому лист опитування підписує відповідальна особа — представник експлуатаційного підприємства й засвідчує його печаткою. При інженерно-технічному аналізі добутих відомостей не слід обробляти їх спільно.

Збирання статистичної інформації виконує персонал служби надійності підприємства-виробника або спеціалізованої організації (НДІ, КБ, лабораторії вузу), що працює за договором із підприємством.

Інженерами-інформаторами повинні працювати спеціалісти, що вивчили конструктивні особливості та специфіку експлуатації спостережуваних виробів, або мають досвід налагодження та експлуатації досліджуваних споруд та технологічних систем.

До початку роботи інженера-інформатора забезпечують розробленою за заводськими кресленнями номенклатурою складальних одиниць і деталей, надійність яких має бути оцінена.

Напрацювання виробів при реєстрації відмов визначають за показаниками лічильників, а для виробів, що не мають лічильників, — за даними обліку змінного, часу з обов'язковим переходом до часів фактичної роботи за допомогою коефіцієнтів внутрішньо змінного використання. Для забезпечення точної локалізації відмов інженер-інформатор повинен володіти каталогом виробів, а також достатнім обсягом основних креслень.

## **2.2. Планування та оцінка експерименту**

Мета планованого спостереження полягає у визначенні потрібного обсягу спостережень для оцінки показників надійності із



заданою точністю та вірогідністю. Планування спостережень передбачає **вибір об'єктів** спостереження; умов експлуатації та режимів роботи; планів проведення спостережень. Об'єктами спостережень є однотипові вироби (група виробів), що не мають конструктивної різниці й виготовлені за єдиною технологією. Вибір місця проведення спостережень повинен забезпечувати найбільш характерні умови експлуатації, а також режими роботи. План спостережень має встановлювати кількість об'єктів спостереження; порядок проведення спостережень; критерій їх припинення.

Плани спостережень, параметри, що визначають режим роботи об'єкта, і спосіб їхнього виміру, припустима похибка й необхідна вірогідність визначення оцінок показників надійності встановлюються в робочих методиках по збору й обробці інформації. Згідно до ГОСТ 27.502-83 [17] передбачено сім планів спостережень, які позначаються спеціальними індексами:  $[NUN]$ ,  $[NUR]$ ,  $[NUT]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NRT]$ ,  $[NMr]$ ,  $[NMT]$ . Букви позначення планів випробувань указують ступінь і характер відновлення об'єктів (елементів):  $U$  — невідновлювані й незамінні при випробуваннях у випадку відмови;  $R$  — відновлювані, або такі, що замінні при випробуваннях у випадку відмови;  $M$  — відновлювані при випробуваннях у випадку відмови;  $N$  — обсяг виборки;  $T$  — термін випробування, або напрацювання на відмову;  $r$  — число відмов елементів, або відмовлених об'єктів;  $S$  — приймання рішення при послідовних випробуваннях.

Вибір планів спостережень залежить від: типу об'єкта, цілей спостереження, оцінюваних показників надійності, умов експлуатації, з урахуванням економічної доцільності й технічної необхідності за [ 3 ].

Вибір потрібних координат експериментальних точок ( $ET$ ) у  $K$ -мірному просторі факторів дозволяє оцінити обсяг експериментальної роботи. При занадто малому обсязі  $ET$ , або неправильно обраних відстанях між ними може виявитися неможливе відкриття основного закону зміни результату, або вийде невелика точність обумовлених характеристик, або не вдасться помітити який-небудь навіть слабкий експериментальний ефект, що має теоретичне, або практичне значення. До подібних же результатів може привести й занадто велика кількість  $ET$ .



При цьому сильно зростають час і вартість проведення експерименту. Для вирішення цього важкого завдання необхідно володіти: результатами теоретичних досліджень; апріорною інформацією про об'єкт дослідження, отриманою іншими експериментаторами; досвідом експериментатора.

Виходячи з аналізу сукупності максимальних і мінімальних значень усіх факторів, знаходять граничні режими об'єкта, область можливих *ET*. Потім вирішують питання про необхідну кількість *ET* і відстанях між ними. При цьому керуються: по-перше, характером експериментальної функції, а по-друге — точністю даних на різних ділянках графічної залежності. Якщо експериментатор не володіє інформацією про характер досліджуваної функції, то *відстані між ET* вибирають однаковими.

Якщо ж вид кривої відомий, то *ET* беруть тим частіше, ніж швидше по них змінюється досліджувана крива. При цьому домагаються однакової зміни якості  $\Delta Q = const$  (рис.2.1) при переході від однієї *ET* до іншої. Кількість точок і їхня частота призначаються з урахуванням не тільки характеру кривої, але точності одержуваних даних.

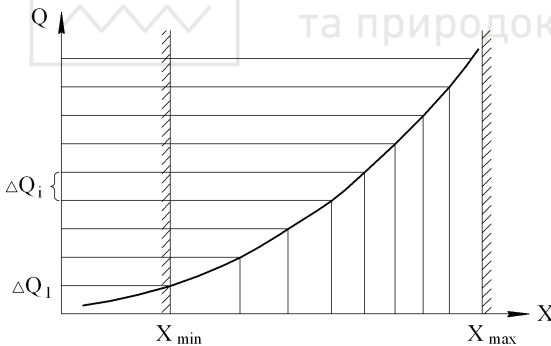


Рис. 2.1. Експериментальна крива  $Q=f(X)$

У першому наближенні можна вважати, що справедливо загальне правило, що пов'язує характер підвищення точності із числом додаткових відліків:

$$\sigma_Q(n_2) = \sigma_Q(n_1) \cdot \sqrt{\frac{n_1}{n_2}}, \quad (2.1)$$

де  $\sigma_Q(n_2); \sigma_Q(n_1)$  — середньо квадратичні відхилення помилки характеристики  $Q$ , отримані при кількості даних, яка дорівнює



відповідно  $n_2$  і  $n_1$ . При  $n_1 = 1$  випливає, що чотири **ET** ( $n_2 = 4$ ) дають у двічі більшу точність, ніж одна.

Результати спостережень за об'єктами техніки являють собою випадкові величини. Випадкові величини можуть бути безперервними або дискретними. Безперервна випадкова величина може приймати будь-яке чисельне значення. Дискретна — приймає тільки рахункові (цілі) значення. Наприклад, число аварій може бути тільки цілим. Випадкова величина позначається зазвичай буквою ( $X$ ). Якщо проводити нескінченну кількість вимірів випадкової величини  $X$ , то безліч їхніх результатів являє собою генеральну сукупність. Але, на практиці це неможливо, бо кількість вимірів має кінцеве значення ( $n$ ). набір вимірюваних значень  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  називається вибіркою обсягу ( $n$ ) з генеральної сукупності або просто вибіркою.

Якщо для опису нескінченної кількості результатів вимірів або чисел використовується ряд загальних характеристик, що обчислюють на підставі генеральної сукупності, то вони називаються параметрами, а якщо на підставі даних вибірки — то статистиками. Однією з таких характеристик є середнє або середньоарифметичне значення вимірів. Це середнє значення, звичайно, позначається  $\bar{x}$  (якщо випадкова величина позначена через  $x$ ) і називається математичним очікуванням.

Якщо вибірка містить усю генеральну сукупність, то середнє значення  $\bar{x}$  позначається грецькою буквою  $\mu$  (в деякій літературі позначається як  $\overline{m_x}$ ):

$$\bar{x} = \mu = m_x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}. \quad (2.2)$$

До числа характеристик відносять інтервал значень, медіану, частоту події, імовірність події, дисперсію. Різниця між максимальним і мінімальним значенням називається **інтервалом**, або **варіацією**. Число, що ділить ряд вимірів на дві рівні частини, називається **медіаною**, якщо число  $n$  — непарне, те центральне число й береться за медіану.

**Приклад 2.1.** У процесі виміру терміну служби 50 ртутно-кварцових ламп отримані наступні значення (упорядковані), табл. 2.2. Таблиця 2.2



### Напрацювання ламп, T, год.

3520	3710	3790	3840	3890	3940	3960	3980	4070	4250
3570	3730	3810	3850	3910	3950	3960	4010	4080	4280
3610	3750	3810	3880	3910	3950	3970	4010	4130	4360
3630	3770	3820	3880	3910	3950	3980	4020	4150	4390
3670	3780	3830	3880	3930	3960	3980	4050	4180	4460
$\bar{x} = 3854,6$								$\sum 192730$	

Найбільше значення **4460**, найменше - **3520**, варіація — **(490)**. Середнє значення цих двох величин називається *серединою інтервалу* (для табл. 2 > **3990**). Інтервал є характеристикою *розкиду* значень випадкової величини  $x$ . У цьому випадку медіана вибирається на рівні **3935**, що є середньою величиною між двома центральними **3930** й **3940**. Чітке уявлення про ряд вимірів дозволяє одержати таблиця 3 «частот появи подій» у кожному відрізку на всьому інтервалі вимірів.

Таблиця 2.3.

#### Частоти появи подій у кожному відрізку та на всьому інтервалі вимірів.

Число вимірів, n	Число інтервалів ,K
40-100	7-9
100-500	8-12
500-1000	10-16
1000-10000	12-22

Для визначення частот інтервал розбивають на ряд відрізків, кількість відрізків залежить від кількості вимірів n. Рекомендації для їхнього вибору наведені й табл. 2.3. У нашому прикладі візьмемо для простоти K=10, а інтервал значень будемо вважати від 3500 до 4500. Підрахувавши кількість вимірів, що потрапили в кожен інтервал, а ці величини назвемо спостережуваною частотою. Щоб надалі не залежати від натуральних значень результатів вимірів, спостережувану частоту  $m_i$  перераховуємо у відносну  $m_i / n$ . Результат зводимо в таблицю 2.4. На підставі даних табл..2.4 будемо графік зміни відносної частоти по інтервалах. (Рис.2.2).

Отримана діаграма у вигляді ламаної лінії (стовпчиків для кожного інтервала) називається гістограмою диференціального розподілу, а ламана лінія, що ілюструє змінюваність накопиченої частоти, називається гістограмою інтегрального (сумарного) розподілу. У цьому випадку число інтервалів повинне бути нескінченно великим, а ширина дуже малою, тоді й ламана лінія перетвориться в криву, що називається функцією розподілу щільності ймовірностей і позначають цю функцію  $f(x)$ .



**Результати обробки вимірів термінів служби ламп.**

Інтервали	350-360	360-370	370-380	380-390	390-400	400-410	410-420	420-430	430-440	440-450
Спостережуван а частота, $m_i$	2	3	6	10	15	6	3	2	2	1
Відносна частота, $m_i/n$	0,04	0,06	0,12	0,2	0,3	0,12	0,06	0,04	0,04	0,02
Накопичена частота, $\sum(m_i/n)$	0,04	0,1	0,22	0,42	0,72	0,84	0,9	0,94	0,98	1

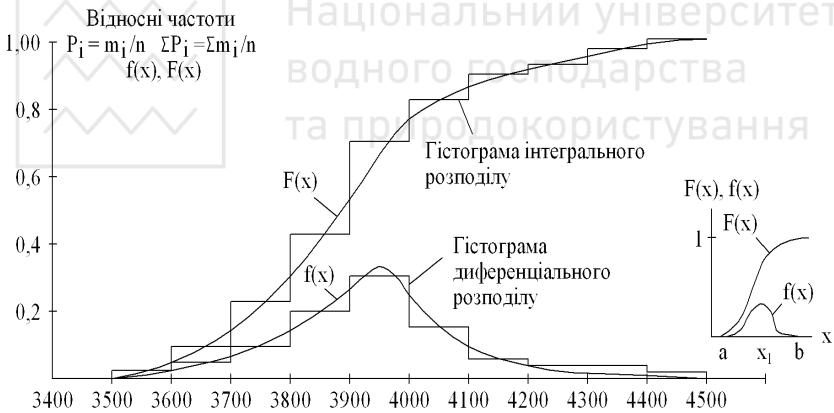


Рис. 2.2. Гістограми диференційного та інтегрального розподілу

Число інтервалів повинне бути нескінченно великим, а їхня ширина дуже малою, тоді й ламана лінія перетвориться в криву, що називається функцією розподілу щільності ймовірностей і позначають цю функцію  $f(x)$ . Значення  $x$ , при якому  $f(x)$  досягає максимального значення, називається модою розподілу  $\approx 3950$ . Звичайно, мода (якщо вона одна) відповідає найбільш часто зустрінутому значенню серед вимірів. Якщо відносні частоти підсумувати від інтервалу до інтервалу, то одержуємо накопичені частоти. Якщо число вимірів довести до нескінченності, а

величину інтервалу зробити нескінченно малою, то гістограма перетвориться в криву інтегрального розподілу ймовірності.

Імовірність того, що термін служби ламп не перевищить 4000 годин, дорівнює 0,75. Щільність розподілу й функція розподілу зосереджені на певному відрізку  $(a, b)$ . За межами цього відрізка  $f(x) = 0$  у прикладі (3500; 4500).

Формулу кривої  $F(x)$  на рис.2.2. називається **інтегральним а.  $f(x)$  диференціальним законом розподілу**. Інтегральний і диференціальний розподіл пов'язані між собою співвідношенням:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx, \quad (2.3)$$

при цьому 
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot dx = 1. \quad (2.4)$$

Інтеграл  $F(x)$  чисельно дорівнює площі під кривою  $f(x)$  ліворуч від ординати, що відповідає  $x$ . Іноді  $F(x)$  позначають ще  $P(x)$ . Але частіше  $P(x)$  позначають дані, отримані з вибірки, а  $F(x)$  - з генеральної сукупності. Значення інтегральної функції розподілу в конкретній точці  $x_0$  буде дорівнювати ймовірності того, що випадкова величина  $X$  буде менше ніж  $x_0$ .

$$F(x_0) = P(X < x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x) \cdot dx. \quad (2.5)$$

Геометрично вона являє собою площу під кривою диференціального розподілу в проміжку від  $-\infty$  до  $x_0$ .

Більше «зручною» кількісною характеристикою є дисперсія  $S^2$ , рівняння для якої у випадку кількості спостережень  $n < 30$  має такий вигляд:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.6)$$

а при кількості спостережень  $n > 30$ ,

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.7)$$





Якщо дисперсія обчислюється для генеральної сукупності, то її позначають  $\sigma^2$ . Середньоквадратичне відхилення  $S = \sqrt{S^2}$ , (2.8)

Співвідношення  $S/\bar{x}$  називають коефіцієнтом варіації й позначають через  $C_v$ . Середнє значення  $\mu(\bar{x})$  іноді називають першим початковим моментом функції розподілу щільності ймовірності. Значення  $\sigma^2$  називається другим моментом розподілу.

Якщо у виразі для  $S^2$  різницю  $(x_i - \bar{x})$  прийняти в степені  $n$ , то при  $n = 3$  одержують третій момент, що називається асиметрією.

При  $n=4$  одержують четвертий момент щодо середнього, який називається ексцесом. Асиметрія вказує на симетрію графіка щодо середнього арифметичного, а ексцес характеризує пологість кривої розподілу щільності ймовірності (гостровершинність). Якщо змінна  $(y)$  дорівнює сумі незалежних змінних  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$

Тоді,

$$\bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \dots + \bar{x}_n, \quad (2.9)$$

$$\bar{S}_y^2 = \bar{S}_{x1}^2 + \bar{S}_{x2}^2 + \bar{S}_{x3}^2 + \dots + \bar{S}_{xm}^2, \quad (2.10)$$

Це правило додавання корисно при аналізі помилок вимірів.

Розрахункові методи оцінки надійності розроблені поки не по всіх критеріях і не для всіх виробів. Тому надійність виробів у цілому в даний час оцінюють за наслідками випробувань, які називають визначальними. Визначальні випробування прагнуть наблизити до стадії розробки виробу. При серійному виготовленні виробів окрім визначальних проводять також контрольні випробування на надійність, які призначені для контролю відповідності серійної продукції вимогам технічних умов за надійністю й ураховують результати визначальних випробувань.

Експериментальні методи оцінки надійності вимагають випробувань значної кількості зразків, тривалого часу й витрат, що є непридатним для виробів із малими серіями, а для великосерійних виробів можливе отримання достовірної інформації на стадії вже виготовленого технологічного оснащення, внесення змін буде дуже коштовним.

Об'єм випробувань, необхідний для підтвердження заданих показників надійності, скорочують шляхом форсування режимів;



оцінки надійності за малим числом або відсутністю відмов; зменшення кількості зразків за рахунок збільшення тривалості випробувань; використання різносторонньої інформації про надійність окремих деталей і вузлів виробу. Об'єм випробувань можна скоротити науковим плануванням випробувань, підвищенням точності вимірювань. За наслідками випробувань для невідновлюваних виробів оцінюють і контролюють, як правило, вірогідність безвідмовної роботи, а для відновлюваних — середнє напрацювання на відмову й середній час відновлення працездатного стану.

Випробування в галузі ВІВ, як правило, цілих об'єктів (споруд) не піддають, а лише окремі елементи чи обладнання (насосні агрегати, трубопровідну арматуру, КВА тощо). Це пов'язано з габаритами споруд, і неможливістю вивести їх із постійної експлуатації на тривалий час випробувань.

План *контрольних випробувань* визначається:

- ♦ видом контрольованих показників надійності, зокрема, показників типу ***T*** (напрацювання, ресурс, термін служби, термін зберігання, час відновлення й т. п.); показників типу ***P*** (вірогідність безвідмовної роботи, безвідмовного зберігання, відновлення за заданий час, гамма-процент для заданого значення показників типу ***T*** і т. п.); комплексних показників;
- ♦ складом початкових даних (знання передбачуваного закону розподілу напрацювань до відмови або граничного стану, ризику споживача, ризику постачальника, норми, значень бракувального, і приймального показника надійності, передбачуваного коефіцієнта варіації напрацювань до відмови, або граничного стану, і т. п.);
- ♦ прийнятим методом контролю (одноступінчатий контроль, послідовний контроль для відновлюваних і невідновлюваних виробів, контроль за допомогою довірчих інтервалів).

Одноступінчатим методом (плани виду  $[NUN]$ ,  $[NUr]$ ,  $[NU(r,T)]$ ,  $[NRT]$ ,  $[NRr]$ ,  $[NMT]$ ,  $[NMT_{\Sigma}]$ , та  $[NMM]$ ,  $[NM(r,T_{\Sigma})]$ ,  $[NU(r_1, n_1)$ ,  $(r_2, n_2) \dots (r_{k-1}, n_{k-1}) r_k]$ ,  $[NU(T_1, n_1)$ ,  $(N_2, n_2) \dots (N_{k-1}, n_{k-1}), T_k]$  і,  $[NUz]$ ) доцільно користуватися при жорсткому обмеженні в термінах, що відводиться на експеримент.



Послідовним методом (плани [NUS], [NRS], [NMS]) доцільно користуватися при обмеженій кількості зразків виробів, що виділяються для випробувань. Цей метод найбільш ефективний при випробуваннях відновлюваних виробів. Метод довірчих інтервалів рекомендується застосовувати при використанні даних експлуатаційних спостережень, а також для уточнення достовірності ухваленого рішення після одноступінчатого контролю.

У багатьох випадках випробування на надійність необхідно проводити до моменту руйнування виробу. Тому випробовують не всі вироби (генеральну сукупність), а невелику їхню частину — вибірку. У цьому випадку вірогідність безвідмовної роботи (надійність) виробу, середнє напрацювання на відмову й середній термін відновлення (параметри надійності) можуть відрізнитися від відповідних статистичних оцінок унаслідок обмеженості й випадковості складу вибірки. Щоб урахувати цю можливу відмінність вводимо поняття довірчої вірогідності.

Довірчою вірогідністю (достовірністю) називають вірогідність того, що дійсне значення оцінюваного параметра або числової характеристики лежить у заданому інтервалі, що називається довірчим. Довірчий інтервал для ймовірності  $p$  обмежений нижнім  $p_n$  і верхнім  $p_e$  значенням границь довірчого інтервалу

$$P(p_n < p < p_e) = \beta, \quad (2.11)$$

де  $P$  — позначає вірогідність події,  $\beta$  указує на значення двобічної довірчої вірогідності, тобто ймовірності попадання в інтервал, обмежений із двох боків.

Аналогічно, довірчий інтервал для середнього напрацювання на відмову обмежений  $T_n$  і  $T_e$ , а для середнього часу відновлення — межами  $T_{e,n}$  і  $T_{e,e}$ .

На практиці можливі два варіанти однобічної вірогідності: перше — числова характеристика не менше нижньої, друге — не вище за верхню межу. Перша умова, зокрема, відноситься до вірогідності безвідмовної роботи й середнього напрацювання на відмову, друге — до середнього часу відновлення. Для вірогідності безвідмовної роботи умова має вигляд



$$P(p_n \leq p) = \alpha, \quad (2.12)$$

де  $\alpha$  — однобічна довірча вірогідність знаходження даної числової характеристики в обмеженому з одного боку інтервалі.

На стадії випробувань дослідних зразків зазвичай приймають  $\alpha = 0,7 \dots 0,8$ . На стадії передачі розробки в серійне виробництво —  $\alpha = 0,9 \dots 0,95$ . При цьому, нижні значення характерні для дрібносерійного виробництва й високої вартості випробувань.

Функцію  $\Phi(t)$  називають *інтегралом імовірностей* (інтегралом Лапласа). Таким чином, функція

$$\Phi(t) = \Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right), \quad (2.13)$$

що відповідає певному гарантійному інтервалу, називається гарантійною ймовірністю. Гарантійний інтервал (межа)  $\varepsilon_0$  і гарантійна ймовірність  $P_a$  характеризують собою точність вимірювання. Залежно від необхідної точності величину ймовірності  $P_a$  можна задавати від 0,9 до 0,999. Гарантійну границю  $\varepsilon_0$  визначають за формулою Стьюдента

$$\varepsilon_0 = \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.14)$$

де  $\sigma$  — статистичне середнє квадратичне відхилення у якості якого для обмеженої виборки слід підставляти розраховане  $\bar{S}$ .

В свою чергу:

$$\sigma = \bar{S}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{при } n \leq 20 \quad (2.15)$$

$$\sigma = \bar{S}_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{при } n > 20 \quad (2.16)$$

де  $\bar{x}_i$  — середнє арифметичне значення (математичне сподівання) для  $x_i$ ;  $t$  — коефіцієнт Стьюдента (знаходять за додатком 1 в залежності від числа ступенів вільності  $k=n-1$  й гарантійної ймовірності  $P_a$ )



При розрахунках коефіцієнт Стюдента  $t$  і, відповідно, гарантійний інтервал  $\varepsilon_0$  необхідно знайти для двох значень гарантійної ймовірності:  $P_a=0,95$  та  $P_a=0,99$ , тобто, відповідно, для  $t_{(0,95)}$  та  $\varepsilon_{0(0,95)}$  і  $t_{(0,99)}$  та  $\varepsilon_{0(0,99)}$ . Кінцевий результат вимірювань слід записати у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \varepsilon_0. \quad (2.17)$$

Тоді з гарантійними ймовірностями:  $P_a = 0,95$  та  $P_a = 0,99$ , відповідно отримаємо

$$x = \bar{x} \pm \varepsilon_{0(0,95)} \text{ та } x = \bar{x} \pm \varepsilon_{0(0,99)}.$$

**Статистичну похибку  $V$** , що визначає собою точність вимірювань, визначають за формулою

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

На практиці намагаються досягти значення  $V < 6\%$ , що говорить про *задовільну точність вимірювань*.

При об'ємі вибірки менше однієї десятої частини генеральної сукупності оцінки нижньої  $p_n$  верхньої  $p_e$  межі вірогідності безвідмовної роботи використовують біноміальний розподіл. При випробуваннях  $n$  виробів довірчу вірогідність виходу на кожну з меж приймають рівній ймовірності появи в одному випадку не більше  $m$  відмов, в іншому випадку не менше  $m$  відмов:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot (1-p_n)^i \cdot p_n^{n-i} = 1 - \alpha, \quad (2.19)$$

$$\sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot (1-p_e)^i \cdot p_e^{n-i} = 1 - \alpha. \quad (2.20)$$

**Приклад 2.9** Оцінити нижню межу вірогідності  $p_n$  при довірчій вірогідності  $\alpha=0,9$ , якщо випробувано три вироби  $n=3$  та відмовив один ( $m=1$ ).

За формулою (2.19)

$$\frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot p_n + \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 1 \cdot 2} \cdot (1-p_n) \cdot p_n^2 = 1 - 0,9 \cdot$$

Остаточо отримуємо  $p_n = 0,2$



У разі безвідмовних випробувань з формули (2.19) при  $m=0$  витікає, що  $P_n$  пов'язано з довірою вірогідністю і кількістю випробуваних виробів виразом

$$\sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot (1-p_n)^i \cdot p_n^{n-i} = p_n^n = 1 - \alpha$$

Відтак,  $p_n = \sqrt[n]{1 - \alpha}$

Для відновлюваних виробів (із заміною або відновленням елементів після відмови) припускають розподіл напрацювання на відмову експоненціальним (такий розподіл, як показує практика, справедливий у значній мірі для верстатів, роботів і інших, у т.ч. гідравлічних машин). Середній ресурс  $T$  оцінюється середнім напрацюванням на відмову випробуваних виробів (оцінка знизу)

$$T = \frac{t_\Sigma}{m}, \quad (2.21)$$

де  $t_\Sigma$  — сумарний час випробувань  $n$  виробів  $t_\Sigma = \sum_{i=1}^n t_i$ ,

$m$  — загальна кількість відмов, що виникли в процесі випробувань.

Величина  $2t_\Sigma / T$  має розподіл  $\chi^2$  — квантилі теоретичного розподілу, що приймаються за довідниками, або таблицею 2.2. з мірами свободи  $2m$  або  $2(m+1)$ ; залежно від того, припиняються випробування після настання чергової відмови або після закінчення терміну випробувань.

Якщо випробування припиняють після закінчення часу випробувань, то імовірнісні співвідношення для величини мають вигляд

$$P\left[\chi_{\alpha; 2m}^2 \geq \frac{2t_\Sigma}{T}\right] = \alpha; \quad P\left[\chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2 \geq \frac{2t_\Sigma}{T}\right] = \alpha \quad (2.22)$$

Звідки

$$T_n = \frac{2t_\Sigma}{\chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2}, \quad (2.23)$$



$$T_{\sigma} = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{\alpha;2m}^2}. \quad (2.24)$$

Якщо розглядається довірча вірогідність  $\beta$  невиходу за двосторонні довірчі межі,  $T_n < T < T_{\sigma}$ , то

$$T_n = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{1+\beta;2;2(m+1)}^2}, \quad (2.25)$$

$$T_{\sigma} = \frac{2t_{\Sigma}}{\chi_{(1-\beta)/2;2m}^2}. \quad (2.26)$$

Розподіл  $\chi^2$  з  $2(m+1)$  та з мірами свободи, відповідним найбільш застосованим значенням довірчої вірогідності, приведено в табл. 2.2.

Національний університет водного господарства та природокористування Таблица 2.2

Число відмов	Значення параметра							
	$\chi_{1-\alpha;2(m+1)}^2$ при $\alpha$				$\chi_{\alpha;2m}^2$ при $\alpha$			
	0,70	0,80	0,90	0,95	0,70	0,80	0,90	0,95
0	2,41	3,22	4,6	6,0	-	-	-	-
1	4,9	6,0	7,8	9,5	0,713	0,446	0,211	0,103
2	7,2	8,6	10,6	12,6	2,19	1,65	1,06	0,71
3	9,5	11,0	13,4	15,5	3,83	3,07	2,20	1,63
4	11,8	13,4	16,0	18,3	5,53	4,59	3,49	2,73
5	14,0	15,8	18,5	21,0	7,27	8,18	4,86	3,94
6	16,2	18,2	21,1	23,7	9,0	7,8	6,3	5,2
7	18,4	20,5	23,5	26,3	10,8	9,5	7,8	6,6
8	20,6	22,8	26,0	28,9	12,6	11,2	9,3	8,0
9	22,8	25,0	28,4	31,4	14,4	12,9	10,9	9,4
10	24,9	27,3	30,8	33,9	16,3	14,6	12,4	10,9

**Приклад 2.11** Випробувано три вироби, кожний протягом 600 год. У процесі випробувань отримано чотири відмови. Після відмов працездатність виробів відновлювали. Потрібно оцінити нижню межу середнього напрацювання на відмову з односторонньою довірчою вірогідністю  $\alpha=0,8$ .

Сумарний час випробувань  $n$  виробів складає год.  
 $t_{\Sigma} = n \cdot t = 3 \cdot 600 = 1800$  год. Скориставшись табл. 2.2, при  $\alpha = 0,8$



знаходимо  $\chi_{1-\alpha; 2(m+1)}^2 = 13,4$ . Підставляючи  $t_\Sigma$  і останнє значення у формулу (2.11), отримаємо  $T_n = 269$  год.

Звичайно, ресурс обладнання, у т.ч. гідравлічних машин залежить від рівня напруги, температури, тиску середовища й інших чинників. Якщо характер цієї залежності вивчений, то тривалість випробувань можна скоротити із часу  $t$  до часу  $t_\phi$  за рахунок **форсування** режиму випробувань

$$t_\phi = \frac{t}{K_{np.}}, \quad (2.27)$$

де  $K_{np.}$  — коефіцієнт прискорення,  $K_{np.} = \frac{\bar{t}}{t_\phi}$ ,  $\bar{t}, t_\phi$  — середні напрацювання до відмови в нормальному і форсованому режимі відповідно.

Значення  $K_{np.}$  обчислюють за залежністю, що пов'язує ресурс з форсуючими чинниками. Зокрема, при втомі або при механічному зношуванні залежність між ресурсом  $\bar{t}$  і напругою в деталі (виробі) має вигляд  $\sigma^m \cdot \bar{t} = const$ , де  $m$  складає в середньому при вигині для покращених і нормалізованих сталей — 6, для загартованих — 9... 12, при контактному навантаженні з початковим торканням по лінії — біля 6, при зношуванні в умовах незначного змащування — 1...2, з періодичним або постійним рівнем мастила, але при недосконалому терті — біля 3. У цих випадках  $K_{np.} = \left( \frac{\sigma_\phi}{\sigma} \right)^m$  де  $\sigma$  і

$\sigma_\phi$  — напруга в номінальному і форсованому режимах відповідно.

Для електричної ізоляції приймають приблизно вірним «правило 10 градусів»: при підвищенні температури на 10 °С ресурс ізоляції скорочується вдвічі. Ресурс мастил і мастил в опорах знижується в два рази із зростанням температури: на 9... 10 °С — для органічних і на 12...20°C — для неорганічних мастил.

Для ізоляції і мастил можна приймати коефіцієнт прискорення

$$\text{випробувань } K_{np.} = \left( \frac{\Theta_\phi}{\Theta} \right)^m.$$





У цьому випадку при випробуванні двох виробів результати будуть позитивними і їх припиняють, якщо протягом часу  $T_n$  у кожного виробу не виникло відмов. Якщо виникла одна відмова, то виріб відновлюють, і випробування кожного виробу продовжують до отримання напрацювання, рівного  $2 \cdot T_n$ . Якщо в додатковий час відмов не виникло, то результати випробувань позитивні. Якщо сумарне число відмов дорівнює двом або більше, то результати випробувань негативні.

### 2.3. Похибки експерименту

Абсолютно точно виміряти фізичну величину неможливо. Результат виміру може бути тільки більш-менш близький до істинного значення вимірюваної величини, результат виміру завжди містить деяку експериментальну похибку. Величина помилки виміру характеризується величиною абсолютної й відносної похибки.

Абсолютна похибка  $\Delta$  являє собою різницю між вимірюваним  $x_e$  і істинними  $X$  значеннями вимірюваної величини  $x$

$$\Delta = x_e - X. \quad (2.28)$$

Більш наочно експериментальна помилка характеризується відносною похибкою виміру  $\delta_x$

$$\delta_x = \frac{\Delta_{\max}}{X} \cdot 100\%. \quad (2.29)$$

Іноді помилково вважають, що варто прагнути до можливо більшої точності виміру, тобто до можливо меншої експериментальної помилки. При цьому випускають з уваги, що підвищення точності вимірів завжди пов'язане з їхнім різким подорожчанням за рахунок великої вартості, особливо точних вимірювальних засобів. От чому достатня точність вимірів повинна встановлюватися залежно від вимог конкретного технічного або наукового завдання. Необхідна в науковому експерименті точність вимірів також лежить у широких межах. Так, експерименти з дослідження теплообміну в газах або рідинах вважаються досить точними при відносній похибці вимірів в 10-15%.

Помилки вимірів поділяються на випадкові, систематичні похибки. Випадковими називаються помилки, які викликаються



Наприклад, короткочасне відключення електроенергії.

Систематичними ж називаються помилки, які викликані факторами, що діють однаково при повторенні вимірів. Систематична помилка може бути викликана: зрушенням початку відліку по шкалі вимірювального приладу, недостатньою точністю робочої формули при непрямих вимірах, похибкою методики проведення експерименту. До систематичних помилок відносяться також приладові помилки виміру. Зовнішню ознаку експериментальної помилки можна виявити при повторенні вимірів.

Якщо результат декількох вимірів виявляється незмінним, похибка визначається як систематична, величина якої не залежить від числа вимірів. У випадку одержання різних значень вимірюваної величини в серії дослідів можна стверджувати, що результат вимірів містить випадкову помилку, яка зменшується із зростанням числа вимірів. Якщо величина систематичної помилки виявилась істотною, то експеримент організують таким чином, щоб фактор, який викликає цю помилку, діяв (при повторенні вимірів) різним шляхом. Тоді систематична помилка вимірів перетвориться у випадкову. Переведення систематичної помилки у випадкову називається рандомізацією похибки виміру.

Особливим типом помилок вважають промахи вимірів — помилки, що грубо спотворюють дослідні результати. Причинами промахів вимірів можуть бути: неуважність спостерігача; будь-які зовнішні впливи, що порушують нормальну роботу вимірювального приладу (різкий стрибок напруги в електромережі, неприпустимий струс приладового стола й т.п. ). Ознака промаху вимірів — істотна відмінність результату від більшості експериментальних значень вимірюваної величини, отриманих у серії вимірів. Наприклад, якщо припустити, що 10% вимірів, які гіпотетично являють собою аномальні значення, відстоять від середнього далі ніж на  $3 \cdot l$  ( $l$  — відрізок на осі  $Ox$ ), а інші спостереження розташовуються в межах  $l$ , то при оцінці дисперсії через  $S^2$ , 10% спостережень щонайменше подвоюють оцінку.

Виникає запитання, за яким кількісним критерієм дані вимірів варто перевіряти на наявність промахів? Тому що «інтуїтивне» відкидання значень, що «не сподобалися» дослідникам, може привести до помилкових оцінок похибки кінцевого результату.



Якщо, наприклад, відкинути експериментальні значення, що в дійсності не є промахами, то оцінка точності результату буде завищеною. Навпроти, якщо серед експериментальних значень залишаться промахи, розрахована точність результату вимірів істотно знизиться. Результат виміру можна вважати промахом (аномальним значенням, грубою похибкою) у тому випадку, якщо ймовірність появи цього результату в даній серії вимірів досить мала.

Якщо число вимірів велике, припустимо прийняти, що значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma \approx S$ , і тому є відомим. Ймовірність появи в серії вимірів результату, що відхиляється від середнього значення більше чим на  $2\sigma_{\bar{x}}$ :

$$1 - P[\bar{x} - 2\sigma_{\bar{x}} \leq X \leq \bar{x} + 2\sigma_{\bar{x}}] \approx 1 - 0,95 = 0,05. \quad (2.30)$$

Отже, усі результати, що відрізняються від  $\bar{x}$  більш ніж на  $2\sigma_{\bar{x}}$  можна відкинути як малоімовірні. Відкидаючи ці значення, які іноді називають «аномальними», треба пам'ятати, що з малою, але відмінною від нуля ймовірністю, вони можуть бути не промахами, а природними статистичними відхиленнями від середнього арифметичного (математичного очікування). Однак, навіть якщо така незначна вірогідність буде реалізована (одне з експериментальних значень буде неправомірно відкинуто), то це не призведе до істотного зниження точності оцінки похибки вимірів.

## 2.4. Відсів грубих похибок для малих виборок

При визначенні показників надійності й, особливо, при подальшому прогнозуванні їхньої мінливості з побудовою модельних залежностей важливо мінімізувати вплив «грубих» похибок (появу аномальних числових значень) вимірюваних показників. Можна зустріти велику кількість різних рекомендацій для проведення відсіювання «грубих» похибок спостереження (**аномальних значень**). Запропонуємо для практичного використання найбільш прості методи відсіювання «грубих» похибок. Такими методами може бути **метод обчислення максимального відносного відхилення** та **метод із застосуванням таблиць Стюдента**.



Якщо експериментатор отримав вибірку з невеликим обсягом ( $n < 25$ ), то можна визначати максимальне відносне відхилення

$$\frac{|x_{\max(\min)} - \bar{x}|}{\bar{S}_x} \leq \tau_{1-p}, \quad (2.31)$$

де  $x_{\max(\min)}$  — крайній (найбільший або найменший) елемент вибірки, по якій підраховувалися  $\bar{x}$  і  $\bar{S}_x$  [див. розд. 2, п. 2.2 формули (2.2) і (2.15-2.16)];  $\tau_{1-p}$  — табличне значення статистики  $\tau$ , яке обчислене при довірчій імовірності  $q=1-p$  (Додаток 2). Таким чином, для подальшого вилучення аномального значення обчислюють величину максимального відносного відхилення ( $\tau_{\max, n}$ ) і порівнюють його з табличним ( $\tau_{1-p}$ ). Таким чином, якщо нерівність  $\tau \leq \tau_{1-p}$  дотримується, то спостереження не виключають з виборки, якщо не дотримується, то спостереження відсівають. На практиці, звичайно, використовується *рівень значущості*  $p = 0,05$ , результат виходить із 95% довірчою ймовірністю. Процедура відсіювання можна повторити й для наступного (по абсолютній величині) максимального відносного відхилення, але попередньо необхідно перерахувати  $\bar{X}$  і  $\bar{S}$  для вибірки нового обсягу  $n-1$ .

**Приклад 2.2.** Кількість пошкоджених ділянок, що прокладені із чавунних труб із діаметром умовного проходу  $d_v = 300$  мм протягом 1 року спостережень складає статистичний ряд ( $x = 45, 35, 27, 29, 43, 74, 10, 12, 18, 27$  шт/рік). Установити: яка кількість аварій на вищезгаданих трубопроводах є аномальною та відсіяти це значення.

Визначимо математичне сподівання для початкової вибірки обсягом  $n_0 = 10$  спостережень.

$$\bar{x} = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} x_i = \frac{45 + 35 + 27 + 29 + 43 + 74 + 10 + 12 + 18 + 27}{10} = \frac{320}{10} = 32$$

Визначимо для кожного поточного значення кількості пошкоджень абсолютні похибки  $\Delta_i = |x_i - \bar{x}|$ . Розрахунки зручно провести у табличній формі

Середнє квадратичне відхилення для початкової вибірки з  $n_0 = 10 < 25$



$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot 132^2} = 41,74$$

Таблиця 2.3

$x_i$	45	35	27	29	43	74	10	12	18	27	$\sum_{i=1}^n x_i = 320$
$ \Delta_i $	13	3	5	3	11	42	22	20	14	5	138

Підозра на аномальність у складі вибірки припадає на елемент  $x_6 = 74$ .

Визначимо для нього максимальне відносне відхилення

$$\tau_{\max} \frac{|74 - 32|}{41,74} = 1,006 \leq \tau_{1-0,05} = 2,29. \text{ Тобто, умова виконана. Підозріле значення}$$

$x_6 = 74$  не підлягає відсіву і не є аномальним для малої виборки. Аналогічні дії слід провести для найменшого значення виборки  $x_7 = 10$ . Враховуючи, що виборка не скоротилась на попередньому етапі то

$$\tau_{\min} \frac{|10 - 32|}{41,74} = 0,53 \leq \tau_{1-0,05} = 2,29. \text{ Цілком очевидно, що і найменше значення не}$$

підлягає відсіву. Отже, початкова виборка зберігається в повному обсязі.

Розглянемо інший метод відсіювання «грубих» похибок у разі надто малої вибірки.

У цьому випадку обчислюють критерій  $\tau'$

$$\tau' = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sqrt{\frac{n-1}{n} \cdot \bar{S}}} \quad (2.31)$$

і отриманий результат порівнюють із критичним значенням, узятим із таблиці 2.4, при відповідних  $n$  і  $1-p$ .

У формулу (2.31) у порівнянні з формулою (2.30) уведений уточнюючий коефіцієнт  $1/\sqrt{(n-1)/n}$ .

Таблиця 2.4

Квантілі розподілу критерію  $\tau'$  (для надто малих виборок)

$n$	$1-p=0,90$ $P=0,10$	$1-p=0,95$ $P=0,05$	$1-p=0,99$ $P=0,01$
3	1,41	1,41	1,41
4	1,64	1,69	1,72
5	1,79	1,87	1,96
6	1,89	2,00	2,13



7	1,97	2,09	2,26
8	2,04	2,17	2,37
9	2,10	2,24	2,46
10	2,15	2,29	2,54

**Приклад 2.3.** Враховуючи, що згідно до попереднього прикладу 2.2 виборка з початковим обсягом  $n_0 = 10$  може вважатися надто малою визначимо критерій  $\tau'$  для неї

$$\tau' = \frac{|74 - 32|}{\sqrt{\frac{10-1}{10} \cdot 32}} = 1,38$$

Порівняємо отримане значення з табличним (для  $P=,05$ )  $\tau'_{таб.} = 2,29$ . Тоді  $\tau' = 1,38 < 2,29$ . Тобто, відсів не слід проводити для даного аномального значення.

Однак, наведені методи є досить грубими і не можуть застосовуватись для великих виборок ( $n \geq 25$ ). В таких випадках краще застосувати табличний метод розподілу Стюдента.

## 2.5. Відсів грубих похибок для виборок великих обсягів

Відсіювання грубих похибок для великої кількості вибірок проводиться за критерієм відповідності Стюдента. Для практичних цілей найкраще використати таблиці розподілу Стюдента.

Критичне значення  $\tau_p$  є процентною точкою нормованого вибіркового відхилення й виражається через критичне значення розподілу Стюдента  $t_{p,n-2}$

$$\tau_{(p,n)} = \frac{t_{(p,n-2)} \cdot \sqrt{n-1}}{\sqrt{n-2 + (t_{(p,n-2)})^2}}, \quad (2.32)$$

Алгоритм вирішення завдання відсіювання аномальних значень може бути представлений у такий спосіб. З вибірки вибирають спостереження, що має найбільше відхилення від середньо-арифметичного значення (математичного очікування),  $\Delta_{\bar{x}} \rightarrow \max$ ; обчислюють:

$$\tau = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{S}. \quad (2.33)$$



За спеціальними таблицями (Додаток 1) знаходять процентні точки  $t$ - розподілу Стьюдента  $t_{p,n-2} : t_{5\%,n-2}$  і  $t_{0,1\%,n-2}$ .

За формулою (2.32) обчислюють відповідні точки відклику  $\tau_{(5\%,n-2)}$  і  $\tau_{(0,1\%,n-2)}$ . Перевіряють досліджуване значення  $x_{max}$  на його знаходження стосовно меж інтервалу  $[\tau_{(5\%,n-2)}, \tau_{(0,1\%,n-2)}]$ . Якщо досліджуване спостереження відповідає умові  $\tau \leq \tau_{(5\%,n-2)}$ , то його не можна відсівати ні за яких умов. Спостереження, що відповідає умові, коли  $\tau > \tau_{(0,1\%,n-2)}$ , його варто відсівати завжди.

Спостереження, які відповідають умові, коли  $\tau_{(5\%,n-2)} < \tau < \tau_{(0,1\%,n-2)}$  відсівають тільки тоді, коли на користь цього є інші фактори або умови.

**Приклад 2.4.** В результаті спостережень за потоком аварій інтенсивність відмов сталевих ділянок водопровідної мережі з  $d_y = 150$  мм отримана кінцева виборка обсягом  $n = 27$ . (табл.2.5).

Таблиця 2.5

Значення інтенсивності відмов ( $\lambda_i \times 10^{-3}$  1/рік)

$i$	$x_i$	$i$	$x_i$
1	3,68	15	4,51
2	3,11	16	4,43
3	4,76	17	3,43
4	2,75	18	3,26
5	4,15	19	2,48
6	5,08	20	4,84
7	2,95	21	5,02
8	6,35	22	6,19
9	3,78	23	4,75
10	4,49	24	4,92
11	2,81	25	2,01
12	4,65	26	1,02
13	3,27	27	4,22
14	4,08		

Спостереження  $x_8=6,35$  викликає підозру в тому, що являється промахом (воно суттєво відрізняється від інших).

Обчислюємо *середнє значення*  $\bar{X}$  із  $n - 1 = 27 - 1 = 26$  результатів, що залишились (попередньо «підозріле значення»  $x_8 = 6,35$  відкидаємо)

Тоді,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{26} \cdot 100,64 = 3,87$$



Обчислюємо *середнє квадратичне відхилення*  $\bar{S}_x$ , використовуючи формулу (2.16), коли  $n = 26 > 25$ .

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{25} \cdot 32,03} = 1,1319,$$

Результати обчислень зводимо в табл.2.6.

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{25} \cdot 32,03} = 1,1319$$

Таблиця 2.6

$i$	$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	3,68	0,19	0,04
2	3,11	0,76	0,58
3	4,76	0,89	0,79
4	2,75	1,12	1,26
5	4,15	0,28	0,08
6	5,08	1,21	1,46
7	2,95	0,92	0,85
8	3,78	0,09	0,01
9	4,49	0,62	0,38
10	2,81	1,06	1,13
11	4,65	0,78	0,61
12	3,27	0,60	0,36
13	4,08	0,21	0,04
14	4,51	0,64	0,41
15	4,43	0,56	0,31
16	3,43	0,44	0,19
17	3,26	0,61	0,37
18	2,48	1,39	1,93
19	4,84	0,97	0,94
20	5,02	1,15	1,32
21	6,19	2,32	5,38
22	4,75	0,88	0,77
23	4,92	1,05	1,10
24	2,01	1,86	3,46
25	1,02	2,85	8,13
26	4,22	0,35	0,12
$\Sigma$	100,64	23,80	32,03

За формулою (2.33) обчислюють  $\tau = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{\bar{S}} = \frac{|6,35 - 3,87|}{1,1319} = 2,191$





$$\tau_{(5\%,26)} = \frac{t_{(5\%,24)} \cdot \sqrt{26-1}}{\sqrt{26-2 + (t_{(5\%,24)})^2}} = \frac{1,710 \cdot \sqrt{25}}{\sqrt{24 + 1,710^2}} = 1,648$$

$$\tau_{(0,1\%,26)} = \frac{t_{(0,1\%,24)} \cdot \sqrt{26-1}}{\sqrt{26-2 + (t_{(0,1\%,24)})^2}} = \frac{3,4668 \cdot \sqrt{25}}{\sqrt{24 + 3,4668^2}} = 2,8882$$

У зв'язку з тим, що  $\tau = 2,191$  знаходиться між двома табличними критичними значеннями  $1,647 < 2,191 < 2,8882$ , то відсів цього максимального значення можна не проводити, хоч при обґрунтуванні можливе і відсіювання цього значення.

### Контрольні запитання

1. Поняття «активний» і «пасивний» експеримент.
2. Критерій оптимізації. Вимоги що до його вибору.
3. Основні способи збирання статистичної інформації.
4. Порядок збирання статистичної інформації.
5. Що таке повна своєчасність і однорідність?
6. Поняття про плани випробувань виробів та обладнання.
7. Поняття про інтервал варіювання.
8. Визначення обсягу експериментальних досліджень.
9. Поняття про генеральну сукупність і виборку.
10. Математичне очікування статистичних даних.
11. Дисперсія та середнє квадратичне відхилення.
12. Поняття про довірчий інтервал для виборок.
13. Форсування випробувань та параметри їх кількісного обґрунтування.
14. З якою метою проводять відсів певних значень із виборки?
15. Методи максимального відносного відхилення та метод Стьюдента.



### 3. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ЗАКони РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН

#### 3.1. Основні теореми теорії ймовірностей

**Теорема 1.** Рівність подій, тобто  $A = B$  означає, що поява однієї з подій спричиняє появу іншої.

**Теорема 2.** Добуток подій  $A$  і  $B$  є подією  $C = A \cdot B$ , що обумовлює виникнення обох подій  $A$  і  $B$ . Сума подій  $A$  і  $B$  є подією  $C = A + B$ , що полягає у виникненні хоча б однієї з подій  $A$  або  $B$ .

**Теорема 3.** Різниця подій  $A$  і  $B$  є подією  $C = A - B$ , яка полягає в тому, що подія  $A$  відбувається, а подія  $B$  не відбувається.

**Теорема 4.** Ймовірність появи кількох *однотипних незалежних і несумісних подій* дорівнює сумі ймовірностей цих подій:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i), \quad (3.1)$$

**Теорема 5.** У загальному випадку для повної групи подій  $A_1, A_2, \dots, A_n$

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1, \quad (3.2)$$

**Теорема 6.** Якщо дві події  $A$  і  $B$  незалежні, то ймовірність сумісної появи двох незалежних подій дорівнює добутковій ймовірностей цих подій:

$$P(AB) = P(A) \times P(B), \quad (3.3)$$

**Наслідок 1.** Коли  $P(A) = P(B)$ , то  $P(AB) = P(A^2)$ , (3.4)

**Наслідок 2.** У загальному випадку

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \times \dots \times P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (3.5)$$

Але, якщо  $P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n)$ , то  $\prod_{i=1}^n P(A_i) = P(A)^n$ . (3.6)



### 3.2. Теоретичні закони розподілу випадкових величин

**Законом розподілу випадкової величини** називається будь-яке співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкових величин і відповідними до них значеннями ймовірностей. Ряд розподілу дискретної випадкової величини можна записати в такому вигляді :

$x_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	•••••	$x_n$
$P_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	•••••	$P_n$

Для графічного зображення ряду по осі абсцис відкладають можливі значення випадкової величини, а по осі ординат — ймовірності цих значень. Така фігура називається багатокутником розподілу (рис. 3.1).

Ймовірності з багатокутника розподілу задовольняють умову:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, \quad (3.7)$$



Рис. 3.1. Багатокутник розподілу дискретної випадкової величини

У разі неперервної випадкової величини ряд розподілу, а також багатокутник розподілу побудувати не можна, оскільки всі можливі значення неперервної випадкової величини складають незліченну множину.

Для кількісної характеристики розподілу ймовірностей неперервної випадкової величини зручно користуватися не ймовірністю події  $X = x$ , а ймовірністю події  $X < x$ , де  $x$  - деяка поточна змінна



величина. Ймовірність цієї події є функцією від  $x$  і називається функцією розподілу випадкової величини  $X$  та позначається

$$F(x) = P(X < x). \quad (3.8)$$

Функцію розподілу  $F(x)$  називають інтегральною функцією розподілу (рис.3.2.), або *інтегральним законом розподілу*. Функція розподілу описує всі випадкові величини — як неперервні, так і дискретні, повною мірою характеризує випадкову величину з ймовірнісної точки зору, тобто є однією з форм закону розподілу.

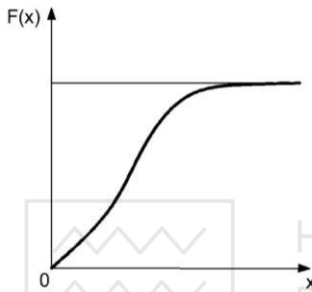


Рис. 3.2. Графік інтегральної функції розподілу неперервної випадкової величини

Щільність неперервної випадкової величини є похідною від інтегральної функції розподілу:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x). \quad (3.9)$$

Графічно щільність розподілу описується кривою розподілу неперервних випадкових величин (рис. 3.3). Щільність елементарного прямокутника, що дорівнює  $f(x)dx$  називають *елементом ймовірності*

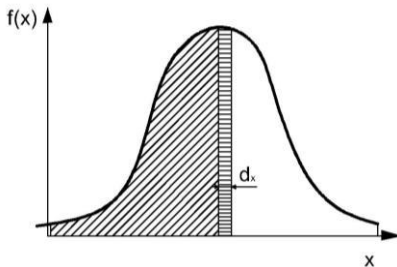


Рис. 3.3. Графік диференціальної функції розподілу неперервної випадкової величини

Функція розподілу  $F(x)$ , як і будь-яка ймовірність, є величиною



безрозмірною. Розмірність щільності розподілу  $f(x)$  обернена щодо розмірності випадкової величини. Як функція розподілу

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{x_i - \bar{x}}{2\sigma^2}\right)}. \quad (3.10)$$

Така функція називається кривою Гауса або нормальним розподілом випадкової величини  $x$ , основними властивостями якої є:

- а) наявність екстремуму (максимуму) при  $x_i = \bar{x}$ ;
- б) симетричність щодо значення  $x_i = \bar{x}$ ;
- в) швидке прагнення до нуля із зростанням різниці виду  $(x_i - \bar{x})$ ;
- г) підпорядкування умові нормування  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$ .

Центральна гранична теорема математичної статистики стверджує: якщо випадкова величина  $x$  має істинне значення  $X = \bar{x}$  і дисперсію  $\sigma^2$ , то при прагненні числа вимірів  $K$  до нескінченності розподіл вибіркового середнього  $\bar{x}$  буде прагнути до гаусового розподілу із середнім значенням  $X$  і дисперсією  $\sigma^2/n$ .

У математичній статистиці для визначення точності й також достовірності математичного сподівання  $m_x$  і дисперсії  $D(x)$  користуються *інтервалами довіри та ймовірностями довіри*. Імовірність того, що математичне сподівання знайдено з похибкою, яка не перевищує деяку величину  $\varepsilon$ , можна записати в такому вигляді:

$$P(m_x - \varepsilon < m_x < m_x + \varepsilon) = \beta, \quad (3.11)$$

тобто невідоме значення  $m_x$  з ймовірністю  $\beta$  покривається інтервалом

$$I_{\beta,m} = (m_x - \varepsilon; m_x + \varepsilon), \quad (3.12)$$

де  $m_x$  — статистична величина математичного сподівання при  $n$  дослідях;  $\varepsilon$  — похибка, яка виникає при визначенні математичного сподівання у разі обмеженої кількості дослідів.



Імовірність  $\beta$  називають ймовірністю довіри, а інтервал  $I_\beta$  — інтервалом довіри. Похибку  $\varepsilon$  можемо записати так:

$$\varepsilon = t_\beta \cdot \sigma_m, \quad (3.13)$$

де  $t_\beta$  — величина, що для нормального розподілу дорівнює кількості середніх квадратичних відхилень  $\sigma_m$ , які потрібно відкласти вправо і вліво від центра розсіву (математичного очікування) для того щоб імовірність попадання в отриманий інтервал дорівнювала  $\beta$ ,  $\sigma_m$  — статичне значення середнього квадратичного відхилення математичного сподівання;

$$\sigma_m = \bar{S}_m = \sqrt{\frac{\overline{D_x}}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)}{n \cdot (n-1)}}. \quad (3.14)$$

У практиці статистичних розрахунків часто доводиться знаходити значення випадкової величини  $x_p$ , для якої умова  $x < x_p$  виконується з ймовірністю  $P$ , тобто,  $P(x < x_p) = P$ . Для нормального розподілу можемо записати:

$$P\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \leq U_p\right) = P_u, \quad (3.15)$$

де  $U_p$  — квантиль ймовірності  $P_u$  є кількістю середніх квадратичних відхилень випадкової величини  $x$ , які потрібно відкласти вправо від її середнього  $\bar{x} = \bar{m}_x$  (рис. 3.4).

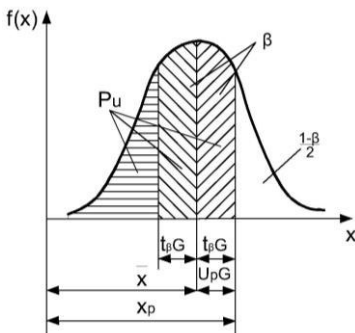


Рис. 3.4 Графік зв'язку між імовірністю квантиля та довірчою ймовірністю для нормального розподілу

У зв'язку з тим, що параметр  $t_\beta$  встановлює ліву і праву межу випадкової величини, а квантиль  $U_p$  — лише праву, то  $U_p < t_\beta$ , а  $P_u > \beta$ .



Якщо  $t_\beta = U_\beta$ , то  $\beta = 2P_u - 1$ . Наприклад, для  $\beta = 0,9$  отримаємо

$t_\beta = 1,645$ . Тоді, узявши  $U_\beta = U_\beta$  для якого  $P_u = 0,95$ . При цьому,  
 $\beta = 2 \cdot 0,95 - 1 = 0,9$ .

Інтервал довіри з урахуванням виразу (3.13) набере вигляду:

$$I_{\beta_m} = (\bar{m}_x - t_\beta \cdot \sigma_{\bar{m}}; \bar{m}_x + t_\beta \cdot \sigma_{\bar{m}}). \quad (3.16)$$

Для невеликих вибірок ( $n < 120$ ) можна розрахувати середнє абсолютне відхилення (САВ)

$$v_{cp.} = \frac{|x_i - \bar{m}_x|}{n}. \quad (3.17)$$

Для вибірки, що має приблизно нормальний закон розподілу, повинно бути

$$\left| \frac{v_{cp.}}{\bar{\sigma}} - 0,7979 \right| < 0,4\sqrt{n}. \quad (3.18)$$

Перевірка нормальності розподілу за розмахом варіювання  $R$

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (3.19)$$

де  $x_{\max}$  і  $x_{\min}$  відповідно максимальне і мінімальне значення серед елементів вибірки

Визначають величину критерію  $R/S$ . Для вибірки з обсягом  $n$  за спеціальними таблицями (Додаток 3) на 10% рівні значущості визначають відповідно максимальне та мінімальне критичне значення критерію  $(R/S)_{\max}$  і  $(R/S)_{\min}$ . Якщо  $R/S$  менше нижньої або більше верхньої границі, то нормального розподілу немає.

Перевірка нормальності розподілу за  $\chi^2$  — критерієм застосовується за умови великої вибірки ( $3 < n < 40$ ) і є графоаналітичним методом. Цей метод припускає використання властивостей *стандартного нормального розподілу*.

Приклад застосування цього методу наведено в (п.3.3, приклад 3.3).

Рівняння кривої стандартного нормального розподілу має вигляд

$$Y = f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{z^2}{2}\right)} \cong 0,4e^{-\left(\frac{z^2}{2}\right)}. \quad (3.20)$$



Для оцінювання показників надійності може бути крім закону розподілу: *нормального* (Гауса) і його різновиди (зрізаний нормальний, логарифмічно нормальний); *експоненціальний*; *Вейбулла*; *гамма-розподіл*.

**Диференціальну функцію (щільність)** для *нормального* закону розподілу неперервних випадкових величин можна записати так:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (3.21)$$

де  $\sigma$  — середнє квадратичне відхилення випадкової величини  $x$ ;  $e$  — основа натурального логарифма ( $e = 2,7183$ );  $x$  — випадкова величина ( $x = t$ );  $a$  - математичне сподівання випадкової роботи ( $\bar{X} = a$ ).

Крива розподілу за нормальним законом має симетричний горбоподібний вигляд (рис. 3.4). Максимальна ордината кривої, що дорівнює  $\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}}$  відповідає точці  $x = a$  (Рис.

3.5)

**Математичне сподівання  $a$**  за нормального закону розподілу є центром асиметрії розсіювання випадкової величини  $x$ . Якщо змінити положення  $a$  по осі абсцис праворуч або ліворуч, крива розподілу буде також зміщатися праворуч або ліворуч, не змінюючи форми. Тобто, центр розсіювання (математичне сподівання  $a$ ) характеризує положення кривої на осі  $0x$ . Параметр розподілу  $\sigma$  є характеристикою найбільшої ординати кривої. Оскільки площа кривої завжди має дорівнювати одиниці, то при зростанні  $\sigma$  крива розподілу стає більш пласкою, розтягуючись уздовж осі абсцис, а при зменшенні — крива розподілу витягується вгору.

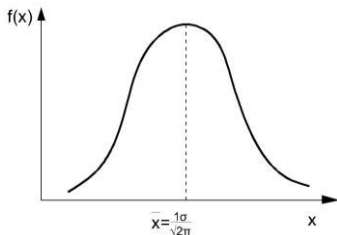


Рис. 3.5. Крива розподілу (диференціальний закон розподілу, або щільність) за нормальним законом

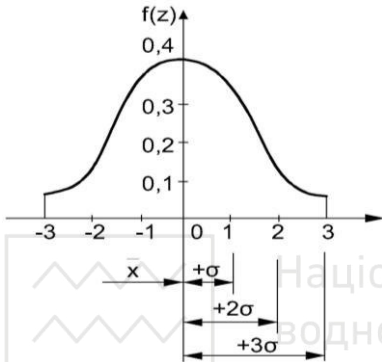




Розмірність  $\sigma$  збігається з розмірністю випадкової величини  $x$ .

Випадкова величина, що підпорядковується нормальному розподілу, має три основні властивості:

- однакові додатні та від'ємні відхилення від середньої арифметичної  $\bar{x}$  рівновіддалені;
- менші відхилення ймовірніші, ніж більші;
- досить великі відхилення від  $\bar{x}$  дуже мало ймовірні.



Де  $z = \frac{x - \bar{X}}{\sigma}$ . Ця функція табульована.

Рис. 3.6. Графік нормованої функції нормального розподілу

Особливістю нормального розподілу є те, що ймовірність, або частість, значень  $x$  у межах від  $\bar{X} - 3 \cdot \sigma$  до  $\bar{X} + 3 \cdot \sigma$  становить 0,9973, тобто близька до одиниці. *Інтегральну функцію* нормального розподілу в загальному вигляді можна подати так:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \cdot dx. \quad (3.22)$$

Нормований нормальний розподіл (рис. 3.6) має параметри  $\bar{X} = 0; \sigma = 1$ . **Щільність** нормованого нормального розподілу:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{z^2}{2}}, \quad (3.23)$$

*Інтегральна функція* нормованого нормального розподілу в загальному вигляді

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz. \quad (3.24)$$



Ймовірність потрапляння нормованої випадкової величини  $x$  в інтервалі  $(0, x)$  знаходять за **функцією Лапласа** ( $F_x = \Phi(z)$ )

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz, \quad (3.25)$$

тоді

$$P(0 < x < X) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dz = \Phi(z). \quad (3.26)$$

Враховуючи, що  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$  і внаслідок симетрії  $f(x)$  відносно

нуля  $\int_{-\infty}^0 f(x) dx = 0,5$  отже, і  $P(-\infty < x < 0) = 0,5$ .

Таким чином,  $F_0(x) = 0,5 + \Phi(z)$ . (3.27)

Графічну інтерпретацію функції Лапласа наведено на рис. 3.7.

Для обчислення функції Лапласа використовують спеціальні таблиці [20, с.22-23]. За функцією розподілу, задаючись значенням випадкової величини, за допомогою функції Лапласа, звичайно, визначають ймовірність того, що значення випадкової величини  $X$  при випробуваннях виявляється меншим за значення  $x$ , або перебуває в певному інтервалі.

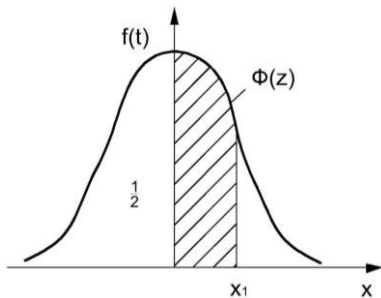


Рис. 3.7. Інтерпретація функції Лапласа

Для розв'язання зворотної задачі визначення випадкової величини  $x$  для заданого рівня ймовірності  $P$ , який позначають  $\alpha$  використовують **квантиль нормального розподілу**, який дає змогу знайти  $x$  при заданому рівні ймовірності  $\alpha = F_0(x)$ :

$$x_\alpha = Z_\alpha \cdot \sigma + \bar{X}, \quad (3.28)$$



де  $Z_\alpha$  — квантиль нормального розподілу;  $\alpha$  — довірна ймовірність,  $\alpha=0,8; 0,9; 0,95; 0,99$  тощо.

На рис.3.8 наведено графічну інтерпретацію квантиля нормального розподілу, з якої випливає, що в найзагальнішому вигляді  $Z_\alpha = -Z_{1-\alpha}$ . Використовуючи квантиль нормального розподілу, знаходять область, у яку потрапляє випадкова величина із заданим рівнем імовірності, або із заданим рівнем значущості  $1 - \alpha$ .

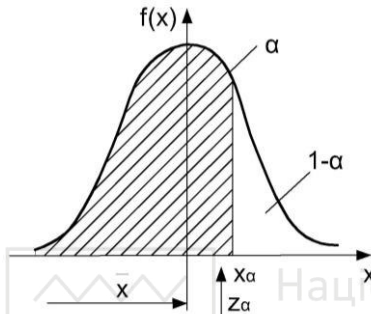


Рис. 3.8. Інтерпретація квантиля нормального розподілу

Закон нормального розподілу використовують для визначення характеристик розсіювання:

- доремонтних, міжремонтних і повних ресурсів, і термінів служби споруд та обладнання та складальних одиниць;
- часу та вартості відновлення працездатності споруд і обладнання та їхніх елементів;
- часу напрацювання на зношувальну (поступову) відмову.

Закон використовують також при складанні кількох однакових або різних законів розподілу.

Розподіл випадкової величини називається логарифмічно нормальним, якщо логарифм цієї величини розподіляється за нормальним законом:

$$f(x) = \frac{1}{t \cdot \sigma_{\ln t} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln t - a_{\ln t})^2}{2\sigma_{\ln t}^2}}, \quad (3.29)$$

де  $a_{\ln t}$  і  $\sigma_{\ln t}$  відповідно математичне сподівання та середнє квадратичне відхилення логарифма випадкової величини.

«Зрізаний» нормальний розподіл відповідає розподілові за нормальним законом, у якого випадкова величина  $X$  однієї чи двох



сторін обмежена певними значеннями, наприклад напрацювання на відмову виробу на початок спостереження, коли воно невідоме.

Експоненціальний закон розподілу можна записати так:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.30)$$

та

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.31)$$

де  $\lambda$  — параметр експоненціального закону розподілу.

Математичне сподівання випадкової величини  $X$ , що має експоненціальний розподіл, — це величина, обернена до  $\lambda$  і яка збігається із середнім квадратичним відхиленням:

$$M[x] = \sigma = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot x} \cdot dx = \frac{1}{\lambda} \quad (3.32)$$

Експоненціальний закон розподілу добре описує розподіл випадкових величин, **домінантного (визначального) фактора**. Експоненціальному закону розподілу підпорядковується розподіл *напрацювання на раптову відмову*. Застосування експоненціального закону розподілу суттєво спрощує всі розрахунки, особливо при аналізі надійності складних систем. Однак про можливість застосування цього закону для оцінки надійності механічних систем було багато думок. Справа в тому, що цей закон уперше було використано в радіоелектроніці, де на ймовірність відмови впливають тільки раптові відмови  $\lambda = \text{const}$ . Дійсно, при  $P(x) \rightarrow 1$  вираз  $\lambda(x) = \frac{f(x)}{P(x)}$  перетворюється на  $\lambda(x) = f(x)$ . Тому для

$0 < x \leq X$  можна говорити і про експоненціальний закон, і про *закон рівної ймовірності*. Якщо проаналізувати поведінку «хвостів» *рівних законів щільності ймовірностей*  $f(x)$  в області малих значень  $F(x)$  (порядку 0,001 і нижче), то всі вони дають однаковий результат з достатньою для практики точністю.

Тому можна вважати допустимим і обґрунтованим застосування експоненціального закону для розрахунку надійності систем із високими вимогами безвідмовності для будь-якої схеми відмов (раптових або поступових). Однак треба завжди мати на увазі, що поширення цього правила на області з великими значеннями



$x \gg X$  може призвести до грубих помилок і неправильних висновків.

У разі застосування нормального закону розподілу використовується лише ділянка кривої навколо центра групування (математичного сподівання). У цій області закони розподілу втрачають індивідуальність, і набирають загальних рис, характерних для рідкісних подій. Так, у даній області інтенсивність відмов  $\lambda(x)$  для будь-якого закону розподілу ще й щільність його розподілу  $f(x)$  майже не відрізняються одна від одної. Експоненціальний закон — це констатація, статика явищ, і його застосування допустиме й виправдане при розрахунку надійності систем, що вже мають високу безвідмовність. Закон не можна застосовувати для прогнозування поведінки цих систем при підвищенні ресурсу й для оцінки тих заходів, які будуть потрібні для підвищення їхньої надійності в межах, що виходять за значення прийнятого ресурсу.

Закон розподілу Вейбулла має залежність виду

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, \quad (3.33)$$

де  $a$  і  $b$  — параметри розподілу закону.

Цей закон за рахунок зміни числових параметрів може набувати різного вигляду. Так, при  $b=1$  він перетворюється на експоненціальний закон, бо  $a=0,5$ . При  $b>1$  він може бути близьким до нормального, а при  $b=2$  матимемо розподіл Релея.

Таку саму гнучкість має й гамма-розподіл. Закони можуть відбивати різноманітні види відмов, характерні для складних виробів. Закон розподілу Вейбулла застосовують для визначення характеристик розсіювання:

- ресурсів або термінів служби окремих деталей та їх сполучень ;
- напрацювань між відмовами від спрацювання (поступовими);
- ресурсів і термінів служби тих складальних одиниць, відмови яких зумовлюються виходом із ладу однієї й тієї самої деталі чи сполучення;
- напрацювань на відмову при руйнуванні від втоми.

Гамма-розподіл має вигляд



$$f(x) = \frac{x^{m-1}}{\Gamma_1^m \Gamma(m)} \cdot e^{-\frac{x}{\Gamma_1}}, \quad (3.34)$$

де  $m$  і  $\Gamma$  — параметри закону розподілу.

### 3.3. Відповідність експериментальних даних теоретичному розподілу

Для багатьох задач практики потрібно оцінювати *точність і достовірність* отриманого *математичного сподівання випадкової величини*. Такі задачі особливо актуальні при малому числі спостережень, оскільки надійність результатів спостережень пов'язана із плануванням дослідів. Цілком очевидно, що недоцільно виконувати, наприклад, 100 дослідів, якщо очікувані характеристики будуть *рівнодійними* або майже рівнодійними при 50 дослідях.

Іншим важливим моментом попередньої обробки даних є перевірка відповідності розподілу результатів виміру закону нормального розподілу. Якщо ця гіпотеза неприйнятна, то варто визначити, якому закону розподілу підкоряються дослідні дані й, якщо це можливо, перетворити даний розподіл до нормального.

Тільки після виконання перерахованих вище операцій можна перейти до побудови емпіричних формул, застосовуючи, наприклад, метод найменших квадратів.

В таблиці 3.1. наводяться можливі розподіли випадкової величини в залежності від описаних вище і прийнятих планів спостережень[3]: [NUN], [NUR], [NUT], [NRr], [NRT], [NMr], [NMT].

На практиці, при аналізі надійності найчастіше доводиться мати справу зі складними об'єктами, в яких можливі найрізноманітніші фізичні причини відмов їхніх окремих елементів. Характеристики потоку відмов підпорядковуються своїм, специфічним законам розподілу.

Оскільки статистична обробка результатів спостережень заснована на використанні **нормального закону розподілу**, то необхідно визначити, чи не супротивить фактичний розподіл числових значень у розглядаємій виборці нормальному закону

(перевірка гіпотези нормальності розподілу експериментальних точок).

Таблиця 3.1

Рекомендації із застосування планів спостережень

План спостереження	Показник надійності	Розподіл випадкової величини
[NUN]	Середній наробіток на відмову, середній ресурс, середній строк служби, гамма-процентний ресурс, гамма-процентний термін служби, імовірність	Вейбула, експоненціальне, нормальне, логарифмічно-нормальне
[NUR]	гамма-процентний ресурс, гамма-процентний термін служби, імовірність безвідмовної роботи	Невідоме
[NUT]	Середній наробіток до відмови, середній ресурс, середній термін служби	Вейбула, експоненціальне, нормальне,
[NR <sub>r</sub> ],[NRT]	Середній наробіток до відмови	Експоненціальне
[NMR]	Середній наробіток на продовження відмову	
	Коефіцієнт готовності	Невідоме
[NMT]	Середній наробіток на відмову	Експоненціальне

Цей етап алгоритму виконується безпосередньо після виключення систематичних похибок та відсіву грубих промахів експеримента. Перевірку можна виконати *аналітичним* чи *графо-аналітичним* способом.

Розглянемо декілька аналітичних способів перевірки гіпотези нормальності розподілу числових значень для виборки на прикладі.



**Приклад 3.1** Для наведеного вище прикладу 2.4 (див.розд.2), де  $\bar{m}_x = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{27} \cdot 106,99 = 3,9626$  необхідно провести перевірку гіпотези відповідності за САВ (серднім абсолютним відхиленням).

$$v_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{m}_x|}{n} = \frac{26}{27} = 0,963$$

Таблиця 3.2.

$n$	$x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	3,68	0,28	0,08
2	3,11	0,85	0,73
3	4,76	0,80	0,64
4	2,75	1,21	1,47
5	4,15	0,19	0,04
6	5,08	1,12	1,25
7	2,95	1,01	1,03
8	6,35	2,39	5,70
9	3,78	0,18	0,03
10	4,49	0,53	0,28
11	2,81	1,15	1,33
12	4,65	0,69	0,47
13	3,27	0,69	0,48
14	4,08	0,12	0,01
15	4,51	0,55	0,30
16	4,43	0,47	0,22
17	3,43	0,53	0,28
18	3,26	0,70	0,49
19	2,48	1,48	2,20
20	4,84	0,88	0,77
21	5,02	1,06	1,12
22	6,19	2,23	4,96
23	4,75	0,79	0,62
24	4,92	0,96	0,92
25	2,01	1,95	3,81
26	1,02	2,94	8,66
27	4,22	0,26	0,07
$\Sigma$	106,99	26,00	37,94





де  $\bar{S}$  — середнє квадратичне відхилення, що визначається за формулою (3.9)

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{n-1} (x_i - \bar{m}_x)^2} = \sqrt{\frac{1}{26} 37,94} = 1,208$$

$$\left| \frac{0,963}{1,208} - 0,7979 \right| = 0,00071 < 0,4\sqrt{27} = 2,078$$

Отже, гіпотеза нормальності розподілу розглянутої вибірки **за критерієм середнього абсолютного відхилення підтверджується.**

**Приклад 3.2** Для наведеного вище прикладу провести перевірку розмахом варіювання  $R$ :  $R = 6,35 - 1,02 = 5,33$

Визначають величину критерію  $R/S = \frac{5,33}{1,208} = 4,412$

Для вибірки обсягом —  $n = 27$  (Додаток 3)  $(R/S)_{\max} = 4,615$ ,  $(R/S)_{\min} = 3,52$ . Порівнюють отримане значення критерію  $R/S$  з критичними значеннями  $(R/S)_{\max}$  і  $(R/S)_{\min}$ . Для наведеного прикладу  $3,52 < 4,412 < 4,615$ , то гіпотеза про нормальний розподіл підтверджується за критерієм  $R/S$  на 10% рівні значущості.

**Приклад 3.3** Для вихідних даних попереднього прикладу проведемо перевірку гіпотези нормального розподілу вибірки графо-аналітичним методом. Для цього спочатку впорядковують вибірку, розмістивши всі спостереження  $x_i$  в зростаючому порядку:  $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$  (в стовпчику 3  $\dot{x}_{ei}$  табл.3.3).

Таблиця 3.3

Результати ранжування дослідних точок із вибірки

$i$	$\dot{x}_i$	$\dot{x}_{ei}$	$j$	$m_j$	$B_j$
1	3,68	$\dot{x}_{\min} = 1,02$	0	1	1
2	3,11	2,01	1	2	3
3	4,76	2,48			
4	2,75	2,75	2	6	9
5	4,15	2,81			
6	5,08	2,95			
7	2,95	3,11			
8	6,35	3,26	3	3	12
9	3,78	3,27			
10	4,49	3,43			



11	2,81	3,66			
12	4,65	3,78			
13	3,27	4,08			
14	4,08	4,15			
15	4,51	4,22			
16	4,43	4,43			
16	4,43	4,43	4	9	21
17	3,43	4,49			
18	3,26	4,51			
19	2,48	4,65			
20	4,84	4,75			
21	5,02	4,76			
22	6,19	4,84			
23	4,75	4,92	5	4	25
24	4,92	5,02			
25	2,01	5,08			
26	1,02	6,19	6	2	27
27	4,22	$\dot{x}_{\max} = 6,35$			

Для розбивки вибірки  $\dot{x}_{gi}$  на інтервали (розряди) знаходять спочатку ширину кожного інтервалу (ціну розряду). Цю вибірку розбивають на  $k$  інтервалів (розрядів), де  $j$  — номер інтервалу (розряду),  $j = 0, 1, \dots, k$ . Ціну розряду (ширину інтервалу) визначають за формулою

$$h = \frac{R}{k}, \quad (3.35)$$

де  $\dot{x}_{i\min} = \dot{x}_{g1}$ ;  $\dot{x}_{i\max} = \dot{x}_{gn}$ ; де  $R = \dot{x}_{i\max} - \dot{x}_{i\min}$  — поле або зона розсіювання (розмах варіювання, див.п.3.2);  $\dot{x}_{gi}$  — впорядковане значення  $x_i$ .

Приймаємо кількість розрядів  $j = 7$  ( $j = 0, 1, \dots, 6$ ).

$R = 6,35 - 1,02 = 5,33$ ;  $h = \frac{5,33}{7} = 0,76$  Нульовий розряд ( $j = 0$ ) має межі

від  $\dot{x}_{g1}$  (мін значення вибірки) до  $\dot{x}_{g1} + h$ , тобто значення більше за ширину інтервалу. Для наведеного прикладу «нульовий інтервал»  $[1,02; 1,02 + 0,76] = [1,02; 1,78]$  ( $j = 0$ ). Перший розряд ( $j = 1$ ) має межі від  $[\dot{x}_{g1} + h; \dot{x}_{g1} + h + h]$   $j = 1$   $[1,78; 1,78 + 0,76] = [1,78; 2,54]$ . Подібним чином проводять розрахунки меж для всіх 7 розрядів.



Після цього підраховують  $m_j$  — кількість величин  $\dot{x}_{ei}$ , що потрапляють в кожний розряд (*частоти*).

Далі знаходять середину кожного розряду

$$\dot{x}_{ej} = \frac{\sum \dot{x}_{ej}}{k_j}, \quad (3.36)$$

де  $\sum \dot{x}_{ej}$  — сума значень величин  $\dot{x}_{ei}$  в розрядах  $j = 0, 1, \dots, k$ .

Також підраховують накопичені частоти  $B_j$  наростаючою сумою (сума значень  $m_j$  від початку до даного включно).

$$B_{j=0} = m_{j=0}; \quad B_{j=1} = m_{j=0} + m_{j=1}; \quad B_{j=2} = m_{j=0} + m_{j=1} + m_{j=2}; \dots \quad B_{j=k} = B$$

За формулою (3.37) слід обчислити значення *інтегралу Лапласа* і результати обчислень записати в табл.3.4

$$\Phi(y) = \frac{B_j}{B_j + 1} - 0,5. \quad (3.37)$$

Таблиця 3.4

Результати розрахунку функції *інтегралу Лапласа*

$j$	$\dot{x}_{ej}$	$m_j$	$B_j$	$\Phi(y_j)$	$y_j$
0	1,02	1	1	0	0
1	2,245	2	3	0,25	0,67
2	3,025	6	9	0,4	1,28
3	3,63	3	12	0,423	1,42
4	4,449	9	21	0,455	1,68
5	4,965	4	25	0,462	1,8
6	6,27	2	27	0,464	1,82

Від'ємному значенню  $\Phi(y)$  відповідає від'ємне значення  $y_j$ , а позитивному – позитивне. Знаючи  $\Phi(y)$  за довідниковою таблицею

вибирають числове значення інтегралу Лапласа  $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ , а

потім, для нього знаходять відповідне значення  $y_j$ . Для кожної пари значень  $\dot{x}_{ej}$  і  $y_j$  відмічають точку в прямокутній системі координат з рівномірною шкалою ( $\dot{x}_{ej}$  — по вісі абсцис,  $y_j$  — по вісі ординат).

З'єднавши точки, отримують графік функції  $y_j = f(\dot{x}_{ej})$  (рис. 3.9). Графік наближений до *лінійного*, а тому наведена вибірка не супротивить розподілу нормального закону.

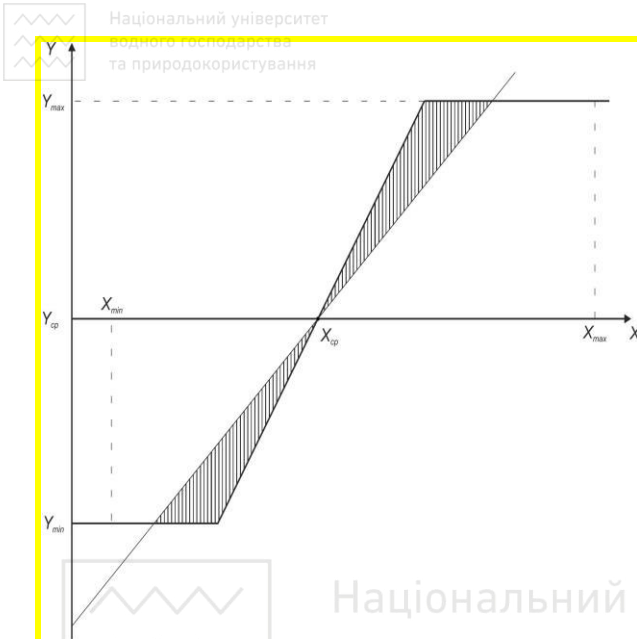


Рис. 3.9. Імовірнісна сітка з графіком емпіричного розподілу випадкової величини

Національний університет водного господарства та природокористування

### Контрольні запитання

1. Які основні теореми теорії ймовірностей відомі?
2. Що таке розподіл випадкової величини і яка його графічна інтерпретація?
3. Що таке інтегральний закон розподілу?
4. Що таке щільність розподілу?
5. Що таке інтервал довіри та як його визначити для виборки?
6. Наведіть визначення відповідності виборки теоретичному закону.
7. Які методи застосовують для перевірки нормальності розподілу виборки?
8. В чому полягає метод  $R/S$  критерію ?
9. Поняття про графо-аналітичний метод.
10. Нормований нормальний закон розподілу. Аналітичний вираз та практичне застосування.
11. Експоненціальний закон розподілу. недоліки і переваги та застосування на практиці.



## 4. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ТА ДЖЕРЕЛ ВОДОПОСТАЧАННЯ

### 4.1. Особливості встановлення критеріїв надійності систем водопостачання

Під надійністю водопостачання розуміють властивість системи виконувати функції водопостачання, зберігаючи в часі встановлені технологічні параметри в межах, що відповідають заданим режимам й умовам експлуатації, технічного обслуговування й зберігання.

Фізичний зміст надійності полягає в здатності систем водопостачання зберігати свої первісні технологічні характеристики в процесі експлуатації. До них можна відносити коефіцієнти забезпеченості витрати  $\alpha_{an,i}$ , напору  $\beta_{av,i}$  і якості води  $K_{av,i}$

Вони визначаються як відношення технологічних параметрів системи (витрати, напору, якості води) у деякому  $i$ -ому стані після закінчення часу  $t_z$  моменту початку експлуатації до відповідного значення технологічного параметра в первісному стані.

Поряд із вимогами до припустимих меж зміни коефіцієнтів забезпеченості робочих параметрів, що характеризують якість функціонування систем водопостачання або їхніх окремих споруд, повинні регламентуватися також тривалість, і припустима частота повторення подібних порушень якості водопостачання з певною довірою ймовірністю  $P(t)$ , що відповідає хоча б точності (вірогідності) інженерних розрахунків. У тих випадках, коли в результаті яких-небудь причин (відмови встаткування, споруд системи або перевищення фактичних обсягів водоспоживання над її можливостями) експлуатаційні показники якості роботи систем не будуть відповідати необхідним коефіцієнтам забезпеченості витрати, напору або якості води, виникає «відмова функціонування», тобто система переходить у непрацездатний стан.

Нормативні вказівки про припустиму забезпеченість подачі води не враховують належною мірою результати дослідження випадкового характеру показників безвідмовності й ремонтпридатності встаткування, що входить до складу систем, тому вони дозволяють принципово лише чисельно характеризувати розрахункові рівні їхнього функціонування в аварійних умовах.



Подібний висновок обумовлений, у першу чергу, тим, що в умовах випадкового характеру процесу водоспоживання, а також процесу зміни станів споруд, що входять до складу систем водопостачання, точне визначення припустимої (за нормативними документами) забезпеченості подачі води не представляється можливим. Вона може бути оцінена як надійність (лише з певною довірою вірогідністю) ґрунтуючись на ймовірнісному аналізі процесів зміни станів споруд та процесу зміни водоспоживання при експлуатації. При застосуванні такого комплексу вимог можливий обґрунтований за техніко-економічними показниками вибір одного з рівнонадійних (стосовно вимог споживача) варіантів рішення систем водопостачання. В якості робочої прийнято *гіпотезу про відсутність відмов* при експлуатації водопровідних споруд у *період між планово-попереджувальними ремонтами та їхніми оглядами*.

*Випадковий характер процесу водоспоживання* враховується *коефіцієнтами погодинної добової нерівномірності*, які задаються в *детерміністичній формі* певною довірою ймовірністю. Подібний же підхід використовується в процесі обліку якості води у водному джерелі.

При цьому необхідний обсяг водоспоживання  $Q_{\text{спож.}}$ , подача водопровідних споруд приймаються незалежними від тривалості й умов експлуатації, тобто перебувають у детерміністичній формі:

$$F(Q_{\text{спож.}}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } Q \geq Q_{\text{спож.}} \\ 0, \text{ якщо } Q \leq Q_{\text{спож.}} \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $F(Q_{\text{спож.}})$  — функція розподілу витрати як випадкової величини.

При даній постановці задачі надійність прийнятих рішень виражається тільки через інженерний запас по подачі  $\Delta Q$  й не враховує випадковий характер показників безвідмовності, ремонтпридатності устаткування, що входить до складу споруд.

Крім того, детерміністична модель гарантує неможливість перевищення розрахункових обсягів водопотреби, знайдених з урахуванням коефіцієнтів годинної і добової нерівномірності в детерміністичній формі, з імовірністю, яка на порядок перевищує ймовірність при підборі устаткування насосних станцій, діаметрів водопровідних мереж, водоводів, споруд для очищення води.



Детерміністична модель розрахунку базується на досить строгій гідравлічній моделі основних споруд систем водопостачання.

У принциповому відношенні даний підхід дозволяє за допомогою імовірнісних моделей знаходити найбільш коректне вирішення завдань із визначенням забезпеченості витрат і якості води водопровідними спорудами завдяки обліку всіх їхніх можливих станів у період експлуатації. У той же час імовірнісні моделі, що описують процес зміни подачі водопровідних споруд при експлуатації, багато в чому схожі на детерміністичний аналог, що дозволяє на основних етапах розрахунку запозичувати вже розроблені методи.

При цьому, загальна постановка задачі забезпечення надійності подачі розрахункової витрати  $Q_{розр}$  води зводиться до визначення складу, схем об'язування, режимів експлуатації устаткування, що гарантують із заданою вірогідністю  $P_z$  задоволення потреб споживача  $Q_{спож}$  при мінімумі приведених витрат коштів  $\Pi$ .

Вона може бути зведена до вирішення рівняння забезпеченості витрати

$$P_z \leq \int_{Q_{розр}, 0}^{\infty} \int_{0}^{\infty} f[Q_{спож}(t)] \cdot f[Q_{розр}(t)] \cdot dQ_{спож}(t) \cdot dQ_{розр}(t). \quad (4.2)$$

При цьому необхідно щоб  $\Pi \rightarrow \Pi_{\min}$  виконувалось для встаткування, і труб, ще й при умові випадкового характеру змінюваності водоспоживання в місцях відбору води по всій системі.

У загальній постановці вирішення рівняння (4.2) задачі забезпечення надійності подачі розрахункової витрати води з урахуванням його випадкового характеру розподілу у вигляді  $f(Q_{розр})$ , а також випадкового характеру процесу водоспоживання протягом розрахункового терміну експлуатації показана на рис. 4.1.

Тут лінія 1 відображає умову  $Q_{спож}(t) = Q_{розр}(t)$ , а рішення, що цікавлять нас, знаходяться в області справа від лінії 1. Таким чином, загальна постановка завдання забезпечення надійності подачі води передбачає облік як випадкового характеру змінюваності подачі води (продуктивності водопровідних споруд) у процесі експлуатації, так і показників безвідмовності, і ремонтпридатності

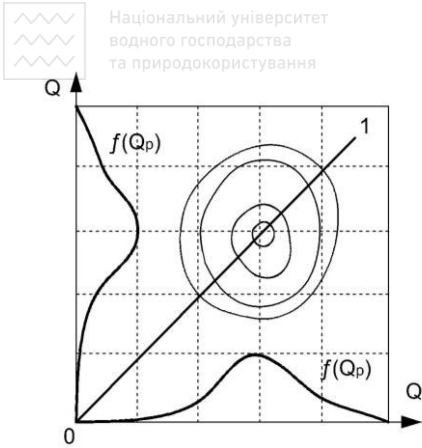


Рис. 4.1. Функція щільності розподілу необхідної і забезпеченої витрати води системою

Дві основні категорії систем водопостачання — виробничого й комунального — істотно розрізняються за *характером виконуваних функцій, режимом роботи; методами визначення їхніх розрахункових параметрів.*

У системах виробничого водопостачання ми маємо зазвичай детермінований і «керований» процес водовикористання, який обумовлений режимом технологічного процесу. Як величини питомого водоспоживання на 1 т продукції, на окремі виробничі установки в одиницю часу, так і загальні об'єми водоспоживання, а також режими відбору води можуть бути в більшості випадків достатньо точно визначені в результаті технологічних розрахунків.

У системах комунального водопостачання визначення вище наведених параметрів їхньої роботи значно ускладнюється. Системи водопостачання населених місць належать до систем масового обслуговування. Відбір води з них у кожен окремий момент часу є сумою запитів (відборів води) споживачів. Ніяке «вольове» регулювання цих відборів практично неможливе. Сумарні відбори води жителями з мережі міського водопроводу є випадковими величинами, які обумовлені поєднанням різних випадкових подій.

Таким чином, для створення можливості нормального функціонування систем комунального водопостачання необхідне виконання глибокого аналізу статистичних закономірностей процесів водовикористання.

Не дивлячись на випадковий характер подій, що впливають на змінюваність у часі кількостей води, яка відбирається із системи, присутні деякі категорії загальних причин, що визначають





характерні зміни водоспоживанні. Сумарний обсяг водоспоживання міста зазнає наступні зміни в часі:

1) щорічне збільшення або зменшення витрат води в процесі експлуатації (тренд);

2) циклічні (періодичні) зміни добових витрат, пов'язані з порою року, кліматичними умовами (температурою повітря, погодою), сезонною міграцією населення;

3) коливання погодинних витрат води протягом кожної окремої доби, коливання обумовлені режимами життя населення, режимом роботи промисловості, ступенем індустріалізації міста, режимом роботи всіх видів транспорту і випадковим поєднаннями низки таких подій, як трансляцією популярних серед населення телепрограм, видовищних заходів, спортивних змагань тощо.

Очевидно, система водопостачання повинна бути здатна задовольняти вимоги споживачів води постійно, включаючи розрахунковий відбір води в «пікові години» доби найбільшого водовідбору за останній рік експлуатації міського водопроводу (або його розширення, реконструкції). Питомі витрати води, які припадають на одного мешканця за добу, для різних категорій благоустрою, і коефіцієнти нерівномірності водоспоживання протягом року (доби) і на протязі години визначаються в результаті обробки фактичних даних про водоспоживання, узагальнення статистичних даних, які наводяться в нормативних документах із проектування систем водопостачання. Норми дають лише наближені й усереднені показники можливих коливань витрат води.

Розрахункові витрати (за останній рік експлуатації водопроводу) до моменту його реконструкції визначаються шляхом прогнозування зростання чисельності населення й питомої норми водоспоживання з урахуванням ступеню благоустрою помешкань. Таким чином, усі використані раніше методи визначення основних розрахункових параметрів водоспоживання не можуть претендувати на велику точність.

Унаслідок неточності прогнозування може виникнути істотна розбіжність між фактичними потребами населення у воді в окремі проміжки часу, і можливостями системи (продуктивністю), тобто відмовами системи. Спроби споживачів відібрати з водопровідної системи більше води, чим вона може подати (при нормальному



функціонуванні), призводять до падіння тиску із системи, і до ще більшого погіршення умов водокористування. Подібна відмова систем виникає не в результаті яких-небудь несправностей або аварій у системі (або її окремих спорудах), а є наслідком лише того, що фактичні потреби споживачів у воді в даний період перевищують передбачувані й визначені в результаті прогнозування.

Своєчасно встановлене відставання потужності системи від швидко зростаючих потреб у воді споживачів у продовж розрахункового терміну може бути попереджене в разі дострокового завершення будівництва споруди й введення в експлуатацію нових потужностей і обладнання для подачі води.

Неточності прогнозування можуть бути й при визначенні темпів зростання водоспоживання протягом розрахункового терміну роботи водопроводу (до його розширення або реконструкції) і циклічних змін режиму водоспоживання в окремі доби року й в окремі години доби. У відповідності з існуючими (затвердженими в установленому порядку) нормативами система міського водопостачання в цілому повинна забезпечити подачу споживачам розрахункових максимальних добових витрат води. По цій же витраті води повинен бути вибрано й джерело водопостачання. У світовій практиці системи міського водопостачання проектуються на забезпечення розрахункових годинних витрат.

Надійність систем комунального водопостачання визначається не тільки законами розподілу випадкових подій, що викликають порушення нормального (запланованого) процесу їхнього функціонування, але й установлені розрахункові параметри цього процесу потребують певної ймовірнісної оцінки. Усе сказане переконує в необхідності проведення систематичних спостережень за фактичним режимом водоспоживання населених місць, обробки отриманих статистичних відомостей і встановлення числових показників надійності (забезпеченості) пікових навантажень системи.

Сучасні системи міського водопостачання є складним комплексом окремих підсистем (споруд, устаткування й елементів), що включають, у свою чергу чисельні й різноманітні елементи: механізми, установки, пристрої, арматуру, прилади, трубопроводи й ін. Основними підсистемами (спорудами або комплексами споруд)



систем водозабезпечення є водоприймальні споруди, насосні станції, очисні споруди, ємкісні споруди, водоводи, водопровідні мережі. Природно, що до цього переліку основних штучних споруд повинні бути додатково внесені природні водоймища, які використовуються як джерела водопостачання, а також система енергопостачання, що забезпечує роботу насосних станцій і встаткування та й інші споруди в системі водопостачання.

Необхідна надійність систем водопостачання може бути визначена тільки в результаті комплексного розгляду всього запроєктованого «ланцюга» водопровідних споруд (технологічна схема від джерела до споживача) і обліку їхньої ролі в спільній роботі.

Зрозуміло, і сам вибір джерела повинен бути проведений на основі ретельного аналізу статистичних даних про коливання водозабезпечення. Відмова одного елементу підсистеми водопостачання не приводить до відмови відповідних споруд, і тим більше системи в цілому. Навіть відмова деяких споруд зазвичай не приводить до повної відмови системи, тобто до припинення водоподачі, а може викликати лише деяке зниження розрахункового рівня водозабезпечення, яке в деяких випадках є припустимим, а іноді й перевищує допустиму встановлену межу.

Вимоги до надійності системи водопостачання повинні встановлюватись, виходячи з інтересів водоспоживачів. Система повинна бути влаштована так, щоб випадкові події не спричинили неприпустимих порушень нормального водозабезпечення.

#### 4.2. Класифікація систем водопостачання за ступенем надійності

Основною функцією системи водопостачання є забезпечення об'єкту, який вона обслуговує (міста, промислового підприємства, будь-якого комунального або громадського об'єкту) водою в заданих кількостях, заданої якості, а також підтримка необхідних напорів у системі розподілу води. Виконання всіх висунутих до системи водопостачання вимог забезпечує **нормальний рівень якості функціонування**. У процесі експлуатації можуть виникати різні порушення нормальної роботи окремих споруд і елементів системи, що неминує викликає певні порушення нормальних



функції системи в цілому, тобто призводить до зниження нормального рівня водопостачання обслуговуваного об'єкта.

Припустимі межі такого зниження передбачаються (або повинні передбачатися) у відповідних нормативних документах. При цьому, повинні регламентуватися перерви в подачі води і їхня припустима тривалість, а також ступінь зниження подачі, що допускається, і тривалість періодів понижень подачі. Повинна бути встановлена гранично допустима частота повторення подібних порушень нормальної роботи. Якщо в результаті яких-небудь причин зниження експлуатаційних показників перевершує допустимі межі, то відбувається «відмова системи».

Найбільш серйозний вплив на процес погіршення роботи систем можуть мати відмови джерел водопостачання, аварії водоприймальних споруд, припинення подачі електроенергії (наприклад, у наслідок виникнення аварій в енергосистемі). Подібні події можуть привести до відмов системи в цілому. Діюча система водопостачання може перебувати в наступних станах:

а) **повної працездатності** – може водозабезпечувати споживачів на нормальному (розрахунковому) рівні;

б) **неповної працездатності** – може водозабезпечувати споживачів на рівні, на більше пониженого в порівнянні з нормальним (розрахунковим), але не нижче встановленої нормами допустимої межі;

в) **непрацездатності** (стан відмови) – система не може виконувати функції водозабезпечення споживачів на нормальному, розрахунковому або допустимому рівні.

Для кожної експлуатованої або запроєктованої системи водопостачання повинен бути чисельно оцінений вплив відмов окремих елементів, і споруд на якість її функціонування в цілому.

Функціонування систем водопостачання в значній мірі залежить від характеру процесу водоспоживання. У цьому відношенні системи водозабезпечення промисловості й населення істотно розрізняються між собою. У системах виробничого водопостачання, зазвичай, має місце детермінований процес водоспоживання. Цей процес, установлений відповідно до технологічних розрахунків, може корегуватися й керуватися обслуговуючим персоналом.

Відповідно, детермінованою є й функція якості функціонування системи водопостачання. Порушення можуть відбутися тільки в



результаті яких-небудь несправностей або пошкоджень елементів цієї системи подачі води, або відмов зовнішніх систем (джерел води або енергопостачання).

У системах комунального водопостачання процес водоспоживання є випадковим і некерованим. Ці системи належать до «систем масового обслуговування», і фактичний режим їхньої роботи визначається випадковим потоком «заявок на воду» великої кількості споживачів. Прогнозовані в процесі проектування системи обсяги й режими водоспоживання можуть відрізнятися від тих, що фактично мають місце в процесі експлуатації. Перехід із працездатного стану в непрацездатне (або в стан неповної працездатності) може відбутися не тільки в результаті пошкодження окремих елементів системи, але й у наслідок періодичних або випадкових відхилень фактичних режимів водоспоживання від запланованих.

Оцінка роботи системи водопостачання може бути проведена за «рівнем якості функціонування» (відношення характеристики якості функціонування системи в деякому, даному стані до відповідної характеристики в справному стані), та «вихідному ефекту» (отримуваний при експлуатації системи за заданий інтервал часу). Конкретні показники оцінок вибираються в залежності від призначення, типу й характеру роботи системи. Для оцінки якості виконання основної функції систем водопостачання можуть бути прийняті: витрати води; співвідношення цих кількостей для періодів порушеного й нормального функціонування системи водопостачання; показники необхідної якості води й тиску; сумарної тривалості періодів зниження якості функціонування до загального календарного терміну експлуатації.

При цьому повинна враховуватися також глибина (ступінь) можливих знижень рівня якості функціонування системи. Істотне значення для оцінки якості функціонування мають також тривалість і частота повторюваності періодів погіршення функціонування. Для будь-яких оцінок погіршення якості функціонування необхідно мати встановлені (нормативні) *«рівні»*, у порівнянні з якими може бути виявлене й виміряне (оцінено) *спостережуване фактичне зниження*. Тільки маючи такі «нормативні рівні», можливо робити висновки про те, чи є спостережуване зниження рівня



водозабезпечення відмовою системи (включаючи, звичайно, випадки повного припинення подачі води споживачам).

Експлуатаційні показники повинні включати характеристику нормального (розрахункового) рівня водозабезпечення, тобто розрахунковий обсяг водоспоживання об'єкту, що обслуговується в розрахунковому режимі водоспоживання, допустимі межі зниження (у аварійних ситуаціях), розрахунковий рівень якості води, допустимі границі його зниження. У нормативних документах із проектування систем водопостачання (СНиП 2.04.02-84 [25], а також у ВБН 46/33-2.5-5-96 [1] – для с/г водопроводів) містяться вказівки про допустимі зміни якості функціонування цих систем.

Усі централізовані системи водопостачання поділені на три категорії за ступенем забезпечення надійності водозабезпечення споживачів. При цьому, вказано, що споживачі всіх трьох категорій допускають тимчасове зниження подачі води на 30% від розрахункового рівня розрахункової витрати на господарсько-питні потреби й на виробничі потреби до межі, яка встановлена аварійним графіком роботи підприємств, при тривалості періодів такого зниження: для I категорії – протягом не більше як до 3 діб; для II категорії – до 10 діб; для III категорії – до 15 діб.

Перерви подачі води допускаються тільки на час виключення пошкоджених і включення резервних елементів системи (устаткування, арматури, споруд, трубопроводів і ін.): для I категорії – на термін не більш, ніж 10 хвилин; для II категорії – допускається не довше, ніж 6 годин; для III категорії – допускається не довше, ніж 1 доба (24 години).

Для деяких підприємств розрахункові витрати води змінюються в окремі пори року, наприклад, у зв'язку зі *змінною температурою води джерела* (на підприємствах, що використовують воду для цілей охолодження). У системах виробничого водопостачання заплановані розрахункові рівні й режими водокористування фактично забезпечуються в процесі експлуатації. Залежно від характеру технологічного процесу можуть установлюватися *допустимі межі тимчасових порушень* нормального водозабезпечення на час ліквідації пошкоджень у системі водоподачі. Для деяких галузей промисловості допускаються *незначні відхилення* від розрахункового рівня водозабезпечення, що



На системи водопостачання, зазвичай, покладається як завдання подачі води на потреби пожежогасіння, так і створення у водопровідній мережі необхідного тиску. У будь-який момент своєї роботи система водопостачання повинна забезпечувати підведення води до заданих точок відбору води (одної або кількох) у кількості, що необхідна для гасіння пожежі. Відбір води на пожежогасіння приводить систему водопостачання в абсолютно новий стан. Системи водопостачання також повинні забезпечувати необхідну якість поданої води.

В усіх випадках система водопостачання починається з джерела й водозабірної споруди, яка отримує воду з нього. Вони й повинні в першу чергу забезпечити водою всю систему, обумовити надійність подачі води й диктують вибір ланцюга споруд у складі цієї системи. Якщо джерело не зможе забезпечувати водою систему, а водозабір неспроможний забезпечувати забір води, про надійність споруд, які продовжують ланцюг споруд водопостачання і всієї системи в цілому вже не йдеться.

### 4.3. Забезпечення режимів стоку поверхневих джерел

За кількістю поверхневих вод Україна належить до малозабезпечених країн. У маловодні роки на її території формується лише  $29,7 \text{ км}^3$  води, що в середньому становить  $49,2 \text{ тис.м}^3$  річкового стоку на  $1 \text{ км}^2$  площі водозбору. Водозабезпечення України залежить від сезонного й територіального розподілу стоку за рахунок 1,1 тисячі водосховищ (загальним об'ємом  $55,1 \text{ км}^3$ ), більше 27 тисяч ставків, 7 великих каналів (загальною довжиною 2000 км), 10 великих водоводів, якими вода подається в маловодні райони.

**Відмова джерела** може спричинити повне порушення функцій водозабезпечення, тобто являє найсерйознішу небезпеку, ніж усі можливі відмови елементів самої системи водопостачання. Під відмовою джерела водопостачання слід розуміти настання такого його стану, у якому він не спроможний забезпечити отримання з нього води взагалі або в необхідній кількості й необхідної якості. Це може відбутися в результаті неприпустимого зниження його



водного господарства та природоохорони  
вират (дебіту), підвищення або зниження рівня води, яке непередбачене режимом його використання, і різке погіршення якості води джерела.

Якість і кількість води поверхневих джерел значно залежать від кількості та інтенсивності атмосферних опадів, танення снігів, забруднення поверхні. Крім цього, кожен тип поверхневих джерел має свою характеристику, включаючи територіальні, кліматичні, метеорологічні, топографічні, геологічні, гідрографічні, гідрологічні, біологічні та інші фактори, а також дані про якість води та її санітарний стан. Для правильного розв'язання задачі з вибору розташування, типу й конструкції водозбору необхідно детально вивчити ці фактори, звернувши особливу увагу на притаманні тільки цьому джерелу особливості.

Ріка, яка впадає в море або океан, називається головною рікою, а ріки, що безпосередньо впадають у неї,— притоками. Під час руху води водотокою формується долина і русло в поперечному і поздовжньому напрямках (рис. 4.2).

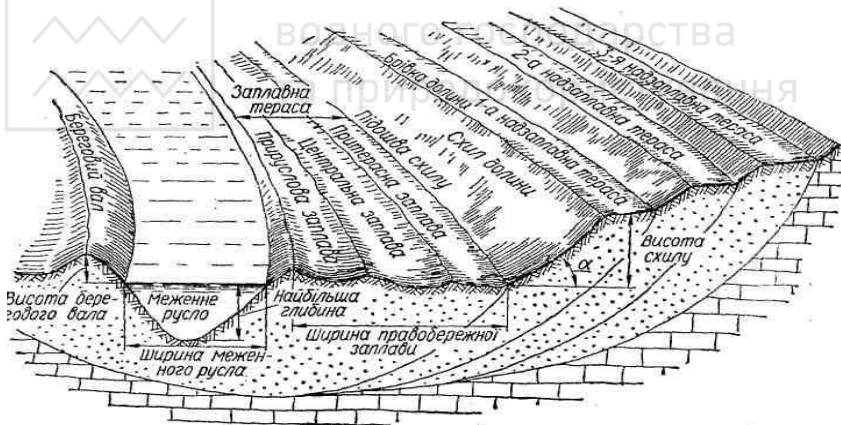


Рис. 4.2. Схема річкової долини

У верхів'ї ріки вода має найбільшу розмивну силу. У *середній частині* ріка має спокійнішу течію, але досить сильну для перенесення розмитих у верхів'ї ґрунтів. У *понижзі* спостерігаються малі швидкості, тому на цій ділянці, звичайно, буває більш-менш інтенсивне відкладання наносів. Виникнення меандр навіть на прямолінійній ділянці ріки пояснюється, з одного боку, наявністю нестійких, що легко розмиваються під впливом течії, берегів, а із





іншого, — неусталеним характером річкового потоку, внаслідок чого виникає поперечна циркуляція в ріці. Крім того, на закругленнях ріки виникають відцентрові сили, які спрямовані в бік угнутого берега й відповідно підвищують рівень води біля нього; на потік діє також обертання Землі (прискорення Коріоліса), у результаті чого й починається розмивання одного з берегів ріки. У місцях найбільшої кривизни ріки в плані ерозійна активність потоку підвищується, внаслідок чого з'являються відносно довгі поздовжні заглибини — плеса. На виході із згину, де ерозійна активність зменшується, вимитий ґрунт скупчується у вигляді поздовжніх кіс — боковиків, утворюючи мілководну відносно коротку прямолінійну ділянку — переказ, який створює звичайно труднощі для водозабирання (рис. 4.3).

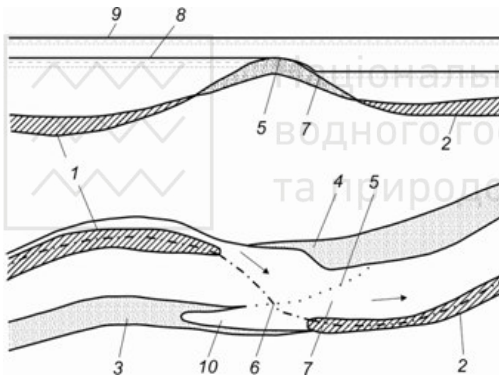


Рис. 4.3. Типові форми русла на завороті: а — поздовжній розріз по фарватеру; б — план: 1 — верхня плесова улоговина; 2 — нижня плесова улоговина; 3 — верхній боковик; 4 — нижній боковик; 5 — гребінь переказу (сідловина); 6 — корито (глибока частина сідловини); 7 — підвалля (обернутий донизу скат гребеня); 8 — межений рівень ріки; 9 — високий рівень ріки; 10 — затонина.

Ріки, залежно від уклону дна русла  $i$ , умовно поділяють на такі ділянки: високогірні при  $i > 0,1$ ; гірські при  $0,01 < i < 0,1$ ; передгірні при  $0,001 < i < 0,01$ ; рівнинні при  $0,0001 < i < 0,001$ ; пригірлові при  $i < 0,0001$ .

Басейном ріки, або водозбірною площею, називається обмежена вододільною лінією площа, стік з якої надходить у головну ріку та її притоки. Кожна ріка має поверхневий і підземний водозбори, межі яких часто не збігаються. У природному (незарегульованому) стані ріки в основному оцінюють за гідрологічними даними,



такими як живлення, стік і витрати; швидкість та рівень води; льодовий режим; твердий стік, а також стійкість русла та біологічні фактори. Вирішальний вплив на особливості режиму живлення річок мають кліматичні та гідрогеологічні фактори. Для більшості річок основними джерелами живлення є поверхневі води: дощові, снігові, льодовикові й змішані. Підземними водами ріки живляться менше. Підземне живлення річок буває як із глибинних водоносних пластів, так і з неглибоко розташованих та алювіальних відкладень річкових долин.

Залежно від джерела живлення, водний режим буває з весняною повинню, характерний для річок зі сніговим живленням, з повинню в теплий період року — для річок, що живляться за рахунок дощів, танення снігів і льодовиків високогірних районів. Для річкової води характерна відносно велика каламутність (особливо в період повеней), високий уміст органічних речовин, бактерій, часто значна кольоровість.

Стік ріки — кількість води, що протікає через переріз ріки за певний проміжок часу (рік, сезон, місяць, декаду чи день) і її витрата — інтенсивність стоку в той чи інший момент часу.

Річковий стік і витрати змінюються залежно від часу, а також ділянки річки. Річки характеризуються сезонними коливаннями витрат і рівнів, швидкостей течії води. Звичайно, стік і витрата збільшуються зі збільшенням водозбірної площі, і тому визначаються для якого-небудь місця чи перетину створу річки. При виборі річки в якості джерела водопостачання необхідно враховувати сезонні коливання її витрати і якості води. Вирішення питання про можливість використання розглядаємого джерела для заданого об'єкту спочатку передусе проведення вишукувань і досліджень, до числа яких входить отримання статистичних даних, що дозволяють визначити надійні рівні забезпеченості, як характеристики стоку річки.

Гідрологічний режим річки в природному стані, тобто прогнозування мінливості її витрат і рівнів води в часі, обумовлюється поєднанням характеру чергування і тривалістю періодів різних метеорологічних умов; сезоном року; змінами температури; кількістю атмосферних опадів; режимом танення снігів; характером водозбірного басейну (площа, рельєф, рослинний покрив, ґрунти). Різні значення витрат і рівнів річки можуть



розглядатися як випадкові події. Вірогідність настання різних станів річки, що характеризуються чисельними значеннями витрат і рівнів води, може бути отримана лише на підставі даних тривалих спостережень за фактичним режимом річки. Коливання рівнів води в річці пояснюються, головним чином, зміною витрат води. У літню пору рівні річок знижуються, бо витрата води в них різко зменшується. Особливо низький рівень буває в період, коли ріка живиться виключно ґрунтовими водами. Рівні води в ріках, звичайно, підвищуються навесні від інтенсивного танення снігу, а влітку від дощових паводків, а також від танення льодовиків і високогірних снігів. До об'єктів гідрометричних спостережень і вимірювань належать рівень води, ухил її поверхні, глибина, ширина й площі водних перерізів, а також швидкість течії, витрати річки й наносів. Гідрометричні спостереження й вимірювання здійснює Гідрометеорологічна служба України на гідрометеорологічних станціях і водомірних постах. За своїм призначенням водомірні пости поділяються на: постійні, що діють тривалий (не менше трьох років) час; тимчасові, які обладнують на нетривалий час (на період розвідувань). Водним перерізом називається площа поперечного перерізу водотоку, нормально розташована до напрямку течії, і обмежена лінією змоченого периметра та поверхнею води. Якщо виділити вертикаль у водному перерізі ріки, то швидкості на цій вертикалі розподіляться так, як показано на рис. 4.4. При відкритому руслі найбільша швидкість течії спостерігається трохи нижче поверхні води. Коли є лід, найбільша швидкість зміщується значно нижче, що пояснюється виникненням опору тертя течії потоку об лід.

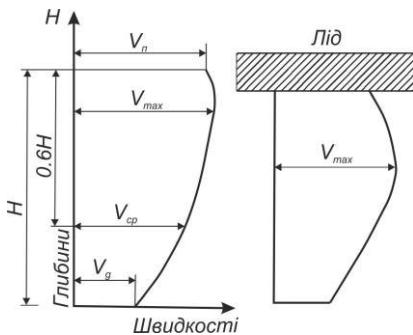


Рис. 4.4. Криві розподілу швидкостей по вертикалі (годографи): а — при вільній поверхні води; б — при льодяному покриві; швидкості:  $V_n$  — на поверхні;  $V_{max}$  — максимальна;  $V_{cp}$  — середня;  $V_0$  — біля дна.



Швидкості води в міру наближення до дна зменшуються і представлені графіком (епюрою) швидкостей по вертикалі — *гідрографом*. При дослідженні досить визначити швидкість у п'яти точках (якщо немає льоду): біля поверхні; на глибинах  $0,2H$ ;  $0,6H$ ;  $0,8H$  та біля дна. Середню швидкість на вертикалі можна визначити за формулою

$$v_{cp} = 0,25 \cdot (v_{0,2H} + 2v_{0,6H} + v_{0,8H}). \quad (4.3)$$

Або, якщо площу епюри швидкостей поділити на її висоту по вертикалі (глибину ріки)  $H$ , то також отримаємо середню швидкість

$$v_{cp} = \frac{\omega}{H}. \quad (4.4)$$

Доведено, що  $v_{cp}$  приблизно дорівнює  $v_{0,6H}$ . Для наближених підрахунків можна прийняти  $v_{cp} = 0,8 \cdot v$  (біля поверхні). Біля берегів швидкість течії, звичайно, мінімальна, а на середині ріки, у смузі найбільших глибин, — максимальна. Якщо позначити через  $Q$  витрату води,  $m^3/сек$ ,  $\omega$  — площу водного перерізу,  $m^2$ ,  $v_{cp}$  — середню швидкість у водному перерізі,  $m/сек$ , можна записати

$$Q = \omega \cdot v_{cp}. \quad (4.5)$$

Для визначення витрат води при будь-якому рівні ріки будують **криві витрат**, які являють собою графічну залежність між витратою й рівнем води в річці.

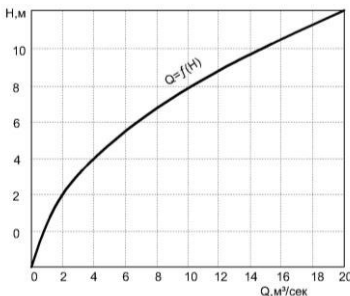


Рис. 4.5. Графік залежності виду  $H=f(Q_p)$

Якщо відкласти по осі абсцис витрати  $Q$ , в  $m^3/сек$ , а по осі ординат — відмітки рівнів —  $H$ , що ним відповідають, то матимемо криву витрат води  $Q=f(H)$ . Створ водомірного спостережного

пункту, у якому вимірюють швидкості течії за допомогою гідрологічної вертушки, попередньо поділяють через **10...20 м** на ряд *швидкісних вертикалей* (рис. 4.6). На кожній із них вимірюють швидкість у трьох або п'яти точках по висоті, після чого визначають середню швидкість  $v_{cp}$  для кожної вертикалі. Елементарні витрати на вертикалях визначають добутком

$$q = v_{cp} \cdot h, \quad (4.6)$$

де  $h$  — глибина води на вертикалі.

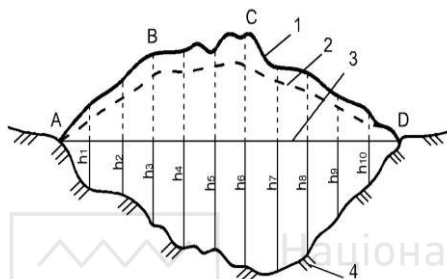


Рис. 4.6. Визначення швидкості і витрати води графомеханічним способом: 1 – крива елементарних витрат; 2 – крива середніх швидкостей; 3 — рівень води в річці; 4 — дно річки.

Після цього їх наносять від рівня води у вигляді вертикальних відрізків, кінці яких утворюють криву елементарних витрат. Основною середньобагаторічною характеристикою стоку річок, що застосовується в практиці, є норма стоку. Вона являє собою середній стік ріки в певному перерізі за багаторічний період (40—50 років) часу. В усіх випадках норма стоку за період визначається як середньоарифметичне із суми стоку, поділеної на кількість спостережень. Для позначення норми стоку застосовують індекс 0. Наприклад,  $Q_0$  означає норму стоку, виражену через середньобагаторічну витрату.

Об'єм стоку,  $W$ , який протікає через даний створ ріки за певний період часу (рік, місяць, добу) і виражається в  $m^3$  або  $km^3$ . Витрата  $Q$  — кількість води, яка протікає через даний створ за одну секунду ( $m^3/сек$ ). Середню витрату ріки за будь-який період можна визначити діленням сумарного об'єму стоку за цей період на кількість секунд у ньому. Модуль стоку  $M$  — кількість води, яка стікає за одну секунду з одиниці площі басейну ріки. У практиці гідрологічних розрахунків модуль стоку виражають у л з 1  $km^2$  площі басейну.



Для обчислення повторюваності можливих значень гідрологічних елементів застосовують методи математичної статистики, які дають змогу оцінити ймовірність появи тих чи інших рівнів, витрат та ін. Забезпеченість визначають побудовою кривих розподілу (повторюваності) і кривих тривалості (забезпеченості). Спочатку будують криву повторюваності, яка показує, скільки, наприклад, максимальних витрат  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$  і т.ін. для даної величини повторювалось за певний проміжок часу (20—30 років). Потім на підставі кривої повторюваності будують криву забезпеченості, щоб додаванням величин  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$  (рис. 4.7) визначити, у скількох випадках витрати перевищують якусь задану величину. Усю кількість витрат, тобто  $\sum n$ , приймають за 100%, так що крива забезпеченості дає витрати різної забезпеченості в відсотках.

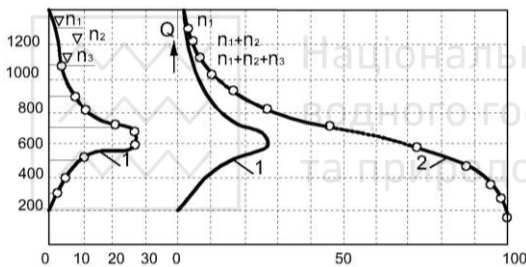


Рис. 4.7. Схема побудови кривої забезпеченості за допомогою кривої повторюваності: 1 — крива повторюваності; 2 — крива забезпеченості

За допомогою кривої забезпеченості можна визначити витрату будь-якої заданої забезпеченості ( $P$ ) у межах даного періоду спостережень, причому чим триваліший період спостережень, тим надійніші результати забезпеченості. У практиці гідрологічних розрахунків застосовують визначення річного стоку різної забезпеченості. Характерними роками, звичайно, вважають:

- ♦ багатоводний 3...1% - ої забезпеченості повторюваністю один раз за 33...100 років;
- ♦ середній — 50%- на повторюваність один раз за два роки;
- ♦ маловодний — 95%-ва повторюваність один раз за 1,05 року (95 раз за 100 років).

Середньорічний стік різної забезпеченості визначають за біноміальною кривою забезпеченості, яку обчислюють за трьома параметрами: середньою витратою за багаторічний період



коefficientом варіації  $C_v$ , і coefficientом асиметрії  $C_s$ . Coefficient варіації ряду середніх річних витрат води за  $n$  років визначають за формулою

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum(K-1)^2}{n-1}}, \quad (4.7)$$

де  $K$  — модульний coefficient.

Значення  $C_s = (1,5 \dots 2) \cdot C_v$ , приймають залежно від ступеню зволоженості географічної зони. Середній річний модуль поверхневого стоку  $M_{сер.}$  для річкового басейну визначається по матеріалам багаторічних спостережень на гідрометричній мережі, а також водно-балансових розрахунків (методом інтерполяції між опорними пунктами для яких визначені табличні  $M_{сер.}$ ). В разі відсутності даних спостережень по картам для центра басейна

$$M_{сер.} = \frac{M_1 \cdot f_1 + M_2 \cdot f_2 + \dots + M_n \cdot f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n}, \quad (4.8)$$

де  $M_1, M_2, \dots, M_n$  — середні значення стоку між ізолініями, що перетинають водозбір, л/с/км<sup>2</sup>;  $f_1, f_2, \dots, f_n$  — площі водозбору між ізолініями і вододілом, км<sup>2</sup>.

Для малих площ водозбору у значення  $M_{сер.}$  вноситься поправка (на особливості місцевих умов).

Середня багаторічна витрата, м<sup>3</sup>/с, визначається за даними багаторічних спостережень методом інтерполяції між сусідніми опорними гідрографічними пунктами, або за формулою:

$$Q_{сер.} = M_{сер.} \cdot F \cdot 10^{-3}, \quad (4.9)$$

де  $F$  — площа водозбору, км<sup>2</sup>.

Об'єм середнього багаторічного стоку  $W_{сер.}$ , км<sup>3</sup>, буде дорівнювати

$$W_{сер.} = Q_{сер.} \cdot 3,154 \cdot 10^{-2}, \quad (4.10)$$

Витрати (стік) річок для різних по водності років), м<sup>3</sup>/с,  $Q_p$ , для років із  $P, \%$ , — забезпеченості визначають за формулою:

$$Q_{P\%} = K_{P\%} \cdot Q_{сер.}, \quad (4.11)$$



де  $K_{p\%}$  — модульні коефіцієнти для переходу від величини стоку середнього по водності року  $Q_{50\%}=Q_{cp}$ . до величини стоку певної —  $P\%$  -безпеченості, їхні значення встановлюють у відповідності з по таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Поправочні коефіцієнти до стоку малих водостоків України

$p, \%$	Коефіцієнт $K_p$ для значень $C_v$							
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1	1,1	1,2
	$C_s=1,5 \cdot C_v$							
<b>5</b>	1,17	1,52	1,9	2,3	2,76	3,02	3,91	3,6
<b>50</b>	0,998	0,963	0,954	0,891	0,76	0,665	0,59	0,4
<b>75</b>	0,93	0,785	0,621	0,421	0,46	0,152	0,094	0,0
<b>95</b>	0,831	0,52	0,253	0,082	0,016	0,006	0,002	0,0
	$C_s=2,0 \cdot C_v$							
<b>5</b>	1,17	1,54	1,94	2,36	2,78	3,0	3,21	3,4
<b>50</b>	0,997	0,97	0,918	0,846	0,746	0,693	0,64	0,5
<b>75</b>	0,931	0,784	0,634	0,489	0,352	0,238	0,241	0,1
<b>95</b>	0,842	0,565	0,342	0,181	0,082	0,051	0,03	0

У тих випадках, коли водосховища влаштовуються виключно з метою поліпшення умов прийому води для систем водопостачання, усі вимоги до режиму використання водосховищ і допустимого коливання рівнів води в ньому задаються проектувальниками системи водопостачання. Для потреб водопостачання використовуються іноді багатоцільові водосховища, створювані для цілей гідроенергетики й одночасно для потреб водного транспорту.

При використанні водосховищ катастрофічною подією можуть бути зруйновані, або серйозно пошкоджені дамби, і різке падіння рівня води у водосховищі, що не дозволяє забирати з нього воду.

При виборі природного джерела води для цілей водопостачання необхідно враховувати не тільки його сьогоdnішній стан, але й можливість його зміни на перспективу (як по кількості, так і по якості води).





#### 4.4. Прогнозування змінюваності гідрогеологічних показників підземних джерел водопостачання

Ресурси підземних вод, як і поверхневих, розподілені по території України дуже нерівномірно. Найбільша їхня кількість, близько 75 %, зосереджена в північно-західній частині. Найменше забезпечені — південні області та район Донбасу. Прогнозні ресурси підземних вод становлять  $22,5 \text{ км}^3$ , з яких у водогосподарському балансі враховується лише  $7 \text{ км}^3$ .

Підземні води майже не містять завислих частинок. Вони, як правило, не забарвлені, але часто мають підвищену жорсткість, відрізняються значним вмістом солей заліза та інших елементів, інколи дуже мінералізовані, можуть мати розчинені гази. Більшість підземних вод надійно захищені від потрапляння в них забруднених поверхневих стоків. Їхня кількість і якість меншою мірою, ніж у поверхневих вод, залежить від атмосферних опадів. За запасами підземні води поділяються на природні та експлуатаційні.

Природні запаси перебувають у водоносних пластах у природному стані, тобто в порах і тріщинах водоносних порід. Вони поділяються на статичні запаси й динамічні запаси. Природні запаси підземних вод змінюються за порами року й кліматичними факторами, а інколи й за діяльністю людини. Ці зміни особливо значні для ґрунтових вод, меншою мірою для міжпластових безнапірних вод, і майже непомітні для напірних (артезіанських) вод. Статичні запаси постійно знаходяться в порах водоносних порід. Кількість їх для водоносних пластів визначаються за формулою

$$Q_{ст.} = \mu \cdot W, \quad (4.12)$$

де  $\mu$  — коефіцієнт водовіддачі породи,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $W$  — об'єм водонасиченості породи,  $\text{м}^3$ .

Динамічні запаси постійно змінюються у водоносному шарі, доповнюючи статичні запаси. Для ділянки водоносного пласта динамічні запаси підземних вод можуть бути визначені за законом Дарсі

$$Q_D = B \cdot h \cdot k \cdot J, \quad (4.13)$$



де  $B$  — ширина потоку підземних вод, м;  $h$  — потужність водонасосного пласта, м;  $k$  — коефіцієнт фільтрації, м/добу;  $j$  — гідравлічний уклон потоку підземних вод.

Динамічні запаси ґрунтових вод великих територій можна визначити залежно від величини інфільтрації атмосферних опадів за формулою

$$Q_l = \alpha \cdot h_0 \cdot B \cdot h = \alpha \cdot h_0 \cdot F, \quad (4.14)$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт інфільтрації (підземного стоку), що вказує, яка частка атмосферних опадів іде на живлення ґрунтових вод і формування підземного стоку;  $h_0$  — середня багаторічна величина (норма) атмосферних опадів;  $F$  — площа, в межах якої відбувається інфільтрація.

Експлуатаційні запаси можна отримати з водоносного пласта раціональними в техніко-економічному відношенні, водозабірними спорудами за заданим режимом експлуатації та при якості води, що задовольняє вимоги споживачів протягом усього розрахункового періоду водопостачання. Загальний об'єм експлуатаційних запасів може бути виражений рівнянням

$$Q = Q_{ст} + Q_d + Q_{доод}, \quad (4.15)$$

де  $Q_{доод}$  — додаткові запаси, що залучаються в процесі водовідбору.

Додаткові запаси підземних вод можуть надходити в експлуатаційний водоносний пласт рівномірно по всій площі, зосереджено в окремих точках або на окремих обмежених ділянках і навіть збоку — на межі області фільтрації. Залежно від ступеня обстеженості, вивченості якості підземних вод та умов їх використання, експлуатаційні запаси підземних вод діляться на чотири категорії —  $A, B, C_1, C_2$ .

Балансові запаси — це запаси, використання яких нині економічно вигідне. Ці запаси відповідають вимогам за кількістю та якістю води певного призначення, і за заданих умов режиму їхньої експлуатації. Позабалансові запаси — це запаси, використання яких тепер економічно не вигідне внаслідок їх малої кількості, невідповідної якості, складності забору та експлуатації, але які можуть бути використані в майбутньому.



#### 4.5. Вибір і оцінка надійності джерела водопостачання

Від джерела водопостачання значною мірою залежить тип усієї системи, спосіб водопідготовки, наявність тих чи інших споруд і, у кінцевому рахунку, вартість її спорудження та експлуатації.

Надійність роботи систем водопостачання також значно залежить від джерела водопостачання, забезпеченості його витрат, рівнів, якості води, часу та швидкості зміни цих показників, кількості і якості наносів, льодові режими, водогосподарський баланс за джерелом із прогнозом на 15—20 років тощо.

При цьому джерело водопостачання повинно відповідати основним, загальним для всіх водоспоживачів, вимогам:

- ✚ забезпечувати отримання необхідної кількості води з урахуванням норм водоспоживання й перспективного розвитку об'єкта,
- ✚ забезпечувати безперервність постачання водою споживачів,
- ✚ подачу води з найменшою витратою коштів;
- ✚ забезпечувати якість води, яка найбільше відповідає потребам споживачів, або дає змогу досягти потрібної якості після її найпростішої та найдешевшої обробки;
- ✚ мати таку потужність, яка забезпечує відбір води із джерела на потреби об'єкта не порушивши сформовану екосистему.

Джерелами господарсько-питного водопостачання слід максимально використовувати наявні підземні води, які задовольняють санітарно-гігієнічним вимогам. Підземні води однієї якості слід використовувати в черговості, яка відповідає ступеню їхньої захищеності від зовнішніх забруднень — у першу чергу, артезіанські води. За відсутності або неможливості використання артезіанських вод через їх недостатню кількість або низьку якість, через небажані техніко-економічні показники необхідно перейти до розгляду можливості використання інших типів підземних вод у такій послідовності: міжпластові безнапірні, і ґрунтові води.

Якщо підземних вод немає або їх неможливо використати, як джерела водопостачання слід розглядати поверхневі води (озера, канали, річки, водосховища, моря). За недостатніх експлуатаційних запасів підземних вод треба розглядати можливість їхнього збільшення за рахунок штучного поповнення. Коли ж недостатня



кількість окремо здобутих підземних і поверхневих вод, слід шукати можливість їхнього спільного використання.

Використання підземних вод питної якості для виробничих процесів можливе лише в районах, де немає інших джерел водопостачання, або коли для цих цілей необхідна вода виключно питної якості. Основними джерелами виробничого водопостачання є поверхневі води й частково — мінералізовані та геотермальні води.

Поверхнєве джерело водопостачання приймається у відповідності із забезпеченістю їх середньомісячних або середньодобових витрат, максимальних і мінімальних рівнів води залежно від категорії надійності подавання води (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Забезпеченість витрат і рівнів води в річках залежно від вимог безперебійності подачі води споживачам

Категорія надійності подавання води	Забезпеченість середньомісячних або середньодобових витрат води, %	Розрахункова забезпеченість рівнів води, %	
		мінімального	максимального
I	95	1	97
II	90	2	95
III	80	3	90

Штучне поповнення запасів підземних вод — це штучне втручання в природний динамічний баланс підземного стоку з метою збільшення його прибуткової частини або зменшення витратної частини цього балансу. При цьому в першу чергу регулюється динамічний баланс підземного потоку й, насамперед, перший напірний або безнапірний водоносний пласт, ізольований або навіть не ізольований водонепроникними пластами від зв'язку з атмосферою, тобто підземного потоку ґрунтових або міжпластових безнапірних і напірних вод. Штучне поповнення підземних вод не веде до втрат території, земель, що використовуються в сільському господарстві, що має місце при регулюванні поверхневого стоку, покращує водний баланс, не призводить до непродуктивних витрат води на випаровування.

Джерелами штучного поповнення запасів підземних вод можуть бути поверхневі води річок, водосховищ, озер, каналів, шахтні та



джерельні води, "відпрацьовані" води систем кондиціонування або охолодження виробничого обладнання, інші незабруднені стічні води. Найбільш сприятливими умовами для штучного поповнення підземних вод це райони з теплим і середнім кліматом, за наявності безнапірних водоносних пластів, складених із добре фільтруючих порід, що виходять на поверхню, або знаходяться неглибоко від поверхні землі. Добрими також є карстові утворення та галечнико-гравійні поклади.

За технічним виконанням штучне поповнення запасів підземних вод можливе шляхом інфільтрації сирової води й внутрішньо ґрунтовою інфільтрацією. Відповідно до цих методів інфільтраційні споруди штучного поповнення розділяють на два типи: відкриті (басейни, ставки, канали, борозни, канали, затоплені території та ін.) та закриті (свердловини, колодязі, галереї тощо).

Обираючи метод штучного поповнення запасів підземних вод, слід завжди пам'ятати, що він обов'язково передбачає штучну зміну природних умов, які склалися століттями, а тому ці втручання можуть мати й негативні наслідки. Так, надмірне наповнення водою поверхневих шарів може призвести до заболочення або засолення ґрунтів. Збагачення водоносних пластів недоброякісними водами може викликати погіршення якості води всього водоносного пласта.

Ступінь надійності забезпечення водними ресурсами основних водокористувачів міста може оцінюватись шляхом розрахунків відносного та абсолютного балансу водних ресурсів для розглядаємої розрахункової балансової ділянки поверхневого джерела. Розрахунки проводять для розрахункової балансової ділянки поверхневого джерела, на території якої розміщено місто, гідрометричні характеристики поверхневого джерела визначають у створі найближчого гідрометричного пункту у верх за течією річки, розрахунки відносного й абсолютного балансу виконують тільки для найбільш несприятливих умов водозабезпечення учасників ВГК (водно-господарського комплексу), звичайно, для найбільш засушливого року та пори року, рівнем забезпеченості згідно табл.3).

Алгоритм розрахунків водного балансу для розглядаємої балансової ділянки поверхневого джерела наступний:

- 1) Відносний водний баланс



$$B_{\epsilon} = \frac{W_{np.} - W_{\epsilon ut.}}{W_{\epsilon ut.}} \cdot 100\% = \frac{B_a}{W_{\epsilon ut.}} \cdot 100\% , \quad (4.16)$$

де  $W_{np.}$  — сумарний обсяг води, що надходить на розрахункову балансову ділянку поверхневого джерела, км<sup>3</sup>, (по прибуткових статтях балансу за підзвітний період);  $W_{\epsilon ut.}$  — сума обсягів води, що незворотно витрачаються з розрахункової балансової ділянки поверхневого джерела, км<sup>3</sup>, (по видаткових статтях балансу за підзвітний період).

Абсолютний баланс водних ресурсів на розрахунковій балансовій ділянці за звітний період, км<sup>3</sup>.

$$B_a = W_{np.} - W_{\epsilon ut.} \quad (4.17)$$

Якщо абсолютний баланс позитивний для всіх років  $p$ -ї забезпеченості ( $B_a > 0$ ). Тоді, водні ресурси балансової ділянки достатні для надійного водопостачання всіх учасників ВГК. Баланс у цілому позитивний для років 5%, 75%, 50% забезпеченості, однак у окремі засушливі роки спостерігається дефіцит водних ресурсів ( $B_a^{95\%} \leq 0$ ). Необхідно створити водосховища для сезонного регулювання стоку балансової ділянки. Відбувається цілком надійне забезпечення водокористувачів міста водними ресурсами.

Баланс позитивний у роки 50%, ..., 75%, - забезпеченості, а у гострозасушливий рік ( $P=95\%$ ) спостерігається дефіцит водних ресурсів ( $B_a^{95\%} \leq 0$ ). Необхідно створювати водосховища багаторічного регулювання, а також запровадити агро меліоративні заходи. Однак, у цьому випадку також надійно забезпечено водними ресурсами водокористувачів міста. Якщо баланс позитивний тільки для років середньої забезпеченості (50%), а для маловодних років (75%, 95%) – негативний ( $B_a^{75\%} = B_a^{95\%} \leq 0$ ). Тоді, необхідно крім заходів багаторічного регулювання стоку здійснити перекидання води із сусідніх балансових ділянок. У цьому випадку відбувається забезпечення водними ресурсами близько 50% від розрахункового обсягу водних ресурсів. Тобто, недостатня забезпеченість, що супроводжуються дефіцитом води в окремі пори року та роки. Баланс від'ємний для всіх років ( $B_a \leq 0$ ). Треба передбачати заходи по обмеженню розвитку окремих галузей, змінювати структуру водоспоживання,



збільшувати об'єми води для розбавлення стічних вод. Водокористувачі міста не забезпечені водними ресурсами.

Для розрахунку **річного прибутку водних ресурсів** ( $W_{пр.}^{95\%}$ ) на розглядаємо балансову ділянку річки (Рис. 4.8):

$$W_{пр.}^{95\%} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5, \quad (4.18)$$

де  $W_1$  — поверхневий сток річки  $p$ -ї забезпеченості, що надходить на розглядаємо розрахункову балансову ділянку зовні з вище розташованих за течією річки балансових ділянок  $W_1 = Q_1 \cdot 3,154 \cdot 10^{-2}$ , км<sup>3</sup>;  $W_2$  — поверхневий сток річки  $p$ -ї забезпеченості місцевого формування (за рахунок притоків річки, які розташовані в межах розглядаємої балансової ділянки річки), км<sup>3</sup>;  $W_3$  — обсяг води, який скидається (у разі потреби, якщо  $B_a \leq 0$ ) в русло річки в межах розглядаємої балансової ділянки за рахунок «спрацювання» штучних водойм (водосховищ),  $W_4$  — частина стоку річки, яка перекидається (у разі потреби, якщо  $B_a \leq 0$ ) із сусідніх балансових ділянок за допомогою штучних транспортних споруд (каналів, трубопроводів), км<sup>3</sup>;  $W_5$  — обсяг зворотніх стічних вод від міських водокористувачів, що повертається в русло річки після доочищення, км<sup>3</sup>;

$$W_1 = Q_1 \cdot 3,154 \cdot 10^{-2}, \quad (4.19)$$

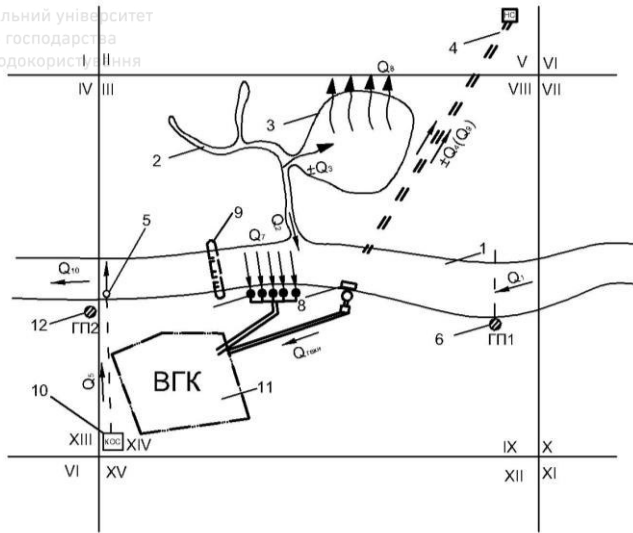
де  $Q_1 = Q_{95\%}$  — стік річки 95%-ї забезпеченості, що приходить на розрахункову балансову ділянку з вище розташованих ділянок поверхневого джерела, м<sup>3</sup>/с;

$$W_2 = Q_2 \cdot 3,154 \cdot 10^{-2}, \quad (4.20)$$

де  $Q_2 = Q_{95\%}^{м.с.}$  — величина місцевого стоку річки, який формується на розглядаємій балансовій ділянці річки, м<sup>3</sup>/с, визначається за довідниковими даними.

$$W_3 = 3,154 \cdot Q_3 \cdot 10^{-2}, \quad (4.21)$$

де  $\pm Q_3 = \pm Q_{с.в.}$  — витрата води, яка надходить в русло поверхневого джерела за рахунок «спрацювання» (+), або наповнення (-) штучних водойм, розташованих в межах розглядаємої балансової ділянки, м<sup>3</sup>/с, (залежить від того, чи абсолютний баланс є позитивним, чи негативним).



**Рис. 4.8.** Схема балансової ділянки річки для оцінки надійності забезпеченості водними ресурсами учасників ВГК міста: 1 — основне русло річки; 2 — русло стоку місцеве формування; 3 — штучні (природні) водойми для накопичення і зберігання обсягів води  $W_3$ ; 4 — трубопроводи (відкриті канали) для перекидання обсягів води  $W_4$ , або  $W_9$  з(на) сусідніх балансових ділянок; 5 — руслові (берегові) водовипуски для спуску доочищених СВ від міста у водне джерело; 6 — гідрометричний пункт на початку балансової ділянки (ГП-1); 7 — створ для розміщення споруд забору підземних вод; 8 — створ для забору поверхневих вод на потреби ВГК міста; 9 — гребля для відбору води на потреби гідроенергетики; 10 — каналізаційні очисні споруди міста; 11 — територія міста (ВГК); 12 — гідрометричний пункт у кінці балансової ділянки (ГП-2).

$$W_4 = 3,154 \cdot Q_4 \cdot 10^{-2}, \quad (4.22)$$

де  $Q_4 = Q_{n.в.}$  — витрата води, яка надходить в русло поверхневого джерела за рахунок надходження води із сусідніх балансових ділянок (+), або перекидання (-) води на сусідні балансові ділянки, розташовані за межами розглядаємої балансової ділянки,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$W_5 = 3,154 \cdot (Q_5^{np.} + Q_5^{i.в.к.}) \cdot 10^{-2} = 3,154 \cdot Q_5 \cdot 10^{-2}, \quad (4.23)$$

де  $Q_5^{np.}$  — сумарна витрата стічних вод, які від промислового сектора повертаються у русло річки після доочищення,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;





— сумарна витрата стічних вод, які від інших водокористувачів міста повертаються в русло річки після доочищення, м<sup>3</sup>/с .

#### 4.6. Забезпечення надійності водозаборів

Надійність роботи водозаборів із поверхневих вододжерел багато в чому залежить від ефективності експлуатації й ремонтпридатності водоприймальних пристроїв. Якщо ступінь надійності водоприймачів не відповідає категорії надійності (табл.4.3) водозабору, то її забезпечують дублюванням самих водоприймачів; забором води у двох створах, що виключає одночасну перерву у відборі води.

Таблиця 4.3

Категорії надійності водозаборів

Категорія системи водопостачання	Категорія надійності	
	необхідна	допустима
I	I	-
II	II	I
III	III	II

Взагалі конструктивна й разом із нею експлуатаційна надійність поверхневих водозаборів забезпечується такими заходами :

1) правильним підбором за конструктивним рішенням і типом водоприймачів й іншого встаткування відповідно до умов експлуатації водозабору (утворення наносів, шуги, зледенінь, льодохід, повені тощо);

2) високою якістю монтажу й обслуговування встаткування;

3) застосуванням додаткових ефективних конструктивних елементів (обігрів та промивання водоприймальних решіток, улаштуванням ковшів або відстійників для очищення води від сміття, наносів, крижаної зависі, створення умов для спливання шуги й ін.).

Однак, як показує досвід експлуатації, перераховані заходи не виключають можливості появи аварій на лініях самопливних і напірних водоводів, відмов насосного устаткування, запірно-регулювальної арматури, ушкоджень сіток й інших механізмів, встановлених на водозаборі. Тому виникає необхідність у



кількісному аналізі ймовірності їхньої появи з метою обґрунтування додаткових заходів по підвищенню надійності забору води.

**Експлуатаційна надійність водозабору** поверхневого джерела забезпечується насамперед необхідною **розрахунковою продуктивністю** як у *нормальних*, так і *надзвичайних*, рідкоповторюваних (*форсованих*) умовах експлуатації, у разі виникнення миттєвих *максимальних* і *мінімальних рівней*, змінюваності стоку і **швидкості** течії у джерелі біля водозабору (табл.4.4). При цьому *категорія водозабору* (за ступенем забезпеченості розрахункової витрати води) повинна відповідати *категорії системи водопостачання*, або бути *вищою за неї*.

Таблиця 4.4

Забезпеченість витрат, рівней води та швидкості течії

Категорія надійності ВЗС	Забезпеченість, P, %					
	Рівня води у джерелі, $H_p$ , м		Стоку річки, $Q_p$ ,		Швидкості течії води, $V_p$ , м/с	
	max	min	max	min	max	min
I	1	97	1	95	1	95
II	2	95	2	90	2	90
III	5	90	3	85	3	85

Експлуатаційна надійність забезпечення забору води в створі водозабору оцінюється коефіцієнтом водовідбору :

$$K_v = \frac{Q_{v-p}}{Q_{95\%}} < 0,3, \tag{4.24}$$

де  $Q_{v-p}$  — секундна продуктивність водозабору, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{95\%}$  — сток річки у найсприятливіший рік (засушливий), м<sup>3</sup>/с.

Слід урахувувати, що проектна продуктивність водозабору завжди вища за потребу споживачів у воді, виходячи з надлишкової надійності водозабору:

$$Q_{v-p} = Q_{кор.} + Q_{дод.}, \tag{4.25}$$

де  $Q_{кор.}$  — «корисна» продуктивність водозабору;  $Q_{дод.}$  — додаткові витрати води



$$Q_{кор} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot q_{ср.сек.}, \quad (4.26)$$

де  $q_{ср.сек.}$  — середньосекундна потреба всіх споживачів у воді на господарсько-питні цілі, м<sup>3</sup>/с;  $K_1$  — коефіцієнт річної нерівномірності водоспоживання;  $K_2$  — коефіцієнт добової нерівномірності водоспоживання;  $K_3$  — коефіцієнт годинної нерівномірності водоспоживання.

З достатнім ступенем точності для практичних розрахунків, величину додаткових витрат можна враховувати коефіцієнтом  $\alpha_{в.п.}$

$$Q_{в-р} = \alpha_{в.п.} \cdot Q_{кор}. \quad (4.27)$$

При оцінці надійності забору води слід визначити мінімально-допустиме зниження подачі води споживачам системою водопостачання:

$$Q_{ав.} = \frac{0,7 \cdot Q_{2-n} + \sum_1^N Q_{np.i}^{ав.}}{24 \cdot 3600}, \quad (4.28)$$

де  $Q_{2-n}$  — середньодобова потреба населеного пункту у воді на господарсько-питні потреби, м<sup>3</sup>/добу; 0,7 — необхідний рівень забезпечення витрати;  $\sum_1^N Q_{np.i}^{ав.}$  — сумарні добові витрати

промислових підприємств, які споживають воду за аварійним графіком, м<sup>3</sup>/добу, що визначаються залежно від технології виробництва продукції.

Таким чином, мінімально-припустимий рівень забезпечення продуктивності водозабору буде встановлений відповідно до мінімально-припустимого рівня забезпечення подачі води системою водопостачання:

$$\alpha_{\min.ав.} = \frac{Q_{ав.}}{Q_{в-р}}. \quad (4.29)$$

Визначають фактичну витрату води, яка припадає на один розрахунковий елемент  $i$ -го виду для для нормального режиму експлуатації водозабору



$$q_{н.1,i} = \frac{Q_{\epsilon-p}}{n_i}, \quad (4.30)$$

$$\text{для форсованого режиму } q_{н.1,i} = \frac{p \cdot Q_{\epsilon-p}}{n-1_i}, \quad (4.31)$$

де  $n_i$  — кількість елементів однакового функціонального призначення (або груп таких елементів). Для нерезервованої системи (елементів):  $n_i=k_i$ ; для резервованих систем з  $m_i$ -кратним резервом:  $n_i=k_i-m_i$ .

Тоді, аварійна продуктивність водозабору для різних рівнів відмови:

$$Q_{ав.,i} = Q_{\epsilon-p} - p_i \cdot q_{н.1,i} + m_i \cdot q_{н.1,i} = Q_{\epsilon-p} + q_{н.1,i} \cdot (m_i - p_i), \quad (4.32)$$

де  $p_i$  - кількість відмовлених елементів  $i$ -го виду.

У разі нерезервованої системи:  $m_i = 0$ ; для резерва заміщенням:  $m_i=n_i$ ; для надлишкового резерву:  $m_i > n_i$ .

На кожному рівні відмови слід визначити коефіцієнти забезпеченості розрахункової витрати для  $i$ -го елемента чи підсистеми:

$$\text{1 рівень: } \alpha_{ав.}^{(1)} = \frac{q_{ав.,i}^{(1)}}{Q_{\epsilon-p}}; \text{ 2 рівень: } \alpha_{ав.}^{(2)} = \frac{q_{ав.,i}^{(2)}}{Q_{\epsilon-p}}; \text{ } j\text{-й рівень: } \alpha_{ав.}^{(j)} = \frac{q_{ав.,i}^{(j)}}{Q_{\epsilon-p}}.$$

На кожному рівні відмови перевіряють виконання умови:

$$\alpha_{ав.,i}^{(j)} \geq \alpha_{ав.дон.} \quad (4.33)$$

У випадку виконання умови (4.33) на будь-якому  $j$ -му рівні відмова  $n_i$  кількості  $i$ -х розрахункових елементів на розглянутому рівні не є «відмовою» водозабору у цілому.

Для водозабору будь-якого типу оцінка показників надійності їхньої роботи включає ряд етапів:

1. Виконують перевірочні розрахунки водозабірних споруд з метою перевірки відповідності їх до діючої нормативно-технічної документації.

2. Зі складу споруд виділяють розрахункові елементи з однаковим технологічним призначенням й складають розрахункову (логічно-структурну) схему для оцінки надійності.



3. Обираються формули для розрахунку надійності водозабірних споруд як технічної системи зі своєю структурою.

Наприклад, для (рис. 4.9) руслового суміщеного водозабору (без врахування відновлення)

а) обчислюємо  $P(t)$  для першого блоку, як послідовно з'єднаних трьох елементів (1,2, 3).

$$P_I(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t). \quad (4.34)$$

Прийнявши за достовірне експоненціальний закон розподілу ймовірності безвідмовної роботи кожного складового елемента  $P(t) = e^{-\lambda \cdot t}$ , записуємо

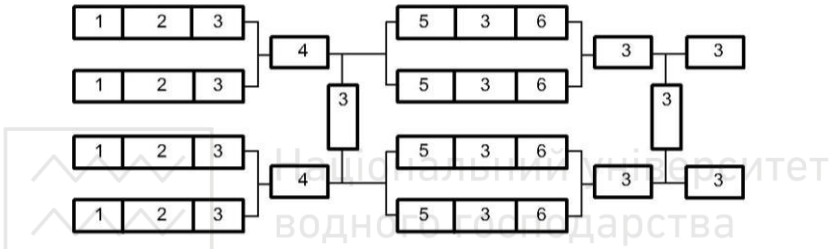


Рис. 4.9. Логічно-структурна схема поверхневого водозабору

1 — оголовок, 2 — самопливні лінії; 3 — засувки; 4 — сітки; 5 — насоси; 6 — зворотний клапан

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 \cdot t_1}; P_2(t) = e^{-\lambda_2 \cdot t_2}; P_3(t) = e^{-\lambda_3 \cdot t_3}, \quad (4.35)$$

При цьому, час, за який оцінюється ймовірність безвідмовної роботи  $t$  найчастіше приймається рівним одному року (8760 годин).

Але,  $t = t_1 = t_2 = t_3 = 8760 год$  тільки в тому випадку, якщо всі елементи нові, або мали до початку періоду оцінки  $P(t)$  однаковий наробіток  $t_0$ .

У загальному ж випадку :

$$t_1 = t_{0,1} + 8760; t_2 = t_{0,2} + 8760; t_3 = t_{0,3} + 8760, \quad (4.36)$$

де  $t_{0,1}, t_{0,2}, t_{0,3}$  — наробіток кожного елемента до початку періоду  $t$ .

Якщо ж всі елементи «нові», тоді :

$$P_I(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} = e^{-\lambda_I \cdot t}, \quad (4.37)$$



б) визначасмо ймовірність безвідмовної роботи двох перших блоків у секції водозабору як системи двох паралельних елементів, При цьому, вважаємо один із блоків робочим, інший — резервним, ( $n = 1; m = 1$ ).

В цьому випадку маємо резерв постійно включений, (спільне резервування)

$$P_{(I-I)}(t) = 1 - [1 - P_I(t)]^{m+1}, \quad (4.38)$$

в) аналогічно обчислюємо ймовірність безвідмовної роботи другого блоку й двох других блоків, що працюють паралельно ( $n = 1; m = 1$ ).

$$P_{II}(t) = e^{-\lambda_5 \cdot t_5 - \lambda_3 \cdot t_3 - \lambda_6 \cdot t_6} = e^{-(\lambda_5 \cdot t_5 + \lambda_3 \cdot t_3 + \lambda_6 \cdot t_6)}. \quad (4.39)$$

Якщо всі елементи «нові», то

$$P_{II}(t) = e^{-(\lambda_5 + \lambda_3 + \lambda_6)t} = e^{-\lambda_{II}t}, \quad (4.40)$$

$$P_{(II-II)}(t) = 1 - [1 - P_{II}(t)]^{m+1}, \quad (4.41)$$

г) Обчислюємо ймовірність безвідмовної роботи однієї секції водозабору як системи послідовно з'єднаних елементів:

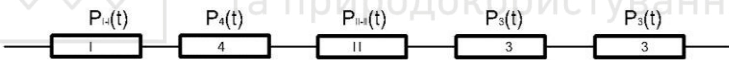


Рис. 4.10. Структурна схема 1-ї секції

$$P_{секц.}(t) = \prod_1^5 P(t) = P_{I-I}(t) \cdot P_4(t) \cdot P_{II-II}(t) \cdot P_3(t) \cdot P_3(t), \quad (4.42)$$

д) Обчислюємо ймовірність безвідмовної дії всього водозабору як системи двох паралельно з'єднаних елементів (секцій). Один із них можна вважати робочим, інший — резервним. ( $n = 1; m = 1$ ).

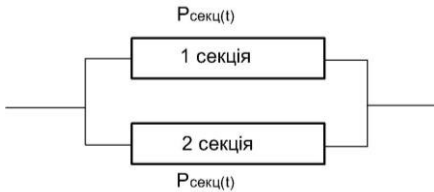


Рис. 4.11. Структурна схема водозабору, як резервованої системи

$$P_{водозаб}(t) = 1 - [1 - P_{секц.}(t)]^{m+1}, \quad (4.43)$$



4. Визначаємо час безвідмовної роботи  $T_{cp}$ . (наробіток на відмову), для цього використаємо наступні міркування:

$$P = e^{-\lambda t}, \text{ звідси: } \lambda = -\frac{\ln P}{t}, T_{cp} = \frac{1}{\lambda} = -\frac{t}{\ln P}, \quad (4.44)$$

$$\text{Тоді, } T_{cp.водозаб} = -\frac{t}{\ln P_{водозаб}(t)}, \quad (4.45)$$

5. Порівнюємо ці величини з нормативами, звичайно ймовірність безвідмовної дії  $P(t) \geq 0,95$  при взагалі неприпустимих перервах. При малій величині  $P$  для всього водозбору в цілому підвищується надійність шляхом збільшення кількості секцій; встановлення більш надійного устаткування; влаштуванням двох окремих водозборів в різних створах.

Слід зазначити, що можливо визначення ймовірності безвідмовної дії з урахуванням ремонту (відновлення). Для цього використаємо видозмінену формулу

$$P(t) = e^{-\frac{\lambda^2}{\mu} t}, \quad (4.46)$$

6. Визначаємо показник якості функціонування (коефіцієнт забезпеченості витрат) при відключенні однієї секції водозбору  $\alpha \geq 0,7$ . Відключення відразу двох секцій, по досвіду експлуатації, вважається малоймовірним. Для обчислення  $\alpha$  проводяться гідравлічні розрахунки водозбору при працюючій одній секції. Можна також використати і відомі формули.

Визначення величин  $\lambda, \mu$  є дуже складним завданням. Їх можна знайти їх у літературі або взяти з досвіду експлуатації. Іноді їх просто складають в напрямку по одній лінії й приймають за  $\lambda_{водозаб}$  і  $\mu_{водозаб}$

Забезпечення надійності підземних водозборів у вигляді декількох водозабірних свердловин, обладнаних заглибними або артезіанськими насосами (рис.4.12). Кожна свердловина має фільтр, насос, обсадні труби, водопіднімальні труби, запірно-регулювальну арматуру, водовід від кожної свердловини, які від двох сусідніх свердловин можуть сходитись в колодязь із засувками, а далі йде збірний водовід.

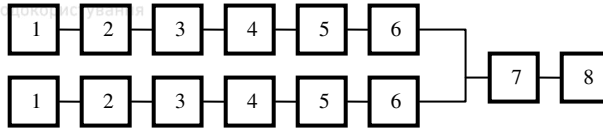


Рис. 4.12. Логічно-структурна схема підземного водозабору:

1 — фільтр; 2 — насос; 3 — обсадні труби; 4 — водопідйомні труби; 5 — запірно-регулювальна арматура; 6 — водовід; 7 — колодезь із засувками; 8 — збірний водовід.

Особливості полягають тільки в *структурних особливостях підземного водозабору, умов його експлуатації та ресурсних показниках* основного обладнання. У табл. 4.5 наведені основні показники надійності елементів водозаборів.

Таблиця 4.5

Показники надійності елементів водозаборів (при  $\beta=0,95$ )

Назва елементів	Інтенсивність відмов, $\lambda \cdot 10^4$ 1/год, $10^4$ 1/год·км			Інтенсивність ремонтів, $\mu \cdot 10^2$ ,1/год.
	$\lambda_{\min}$	$\lambda_{\text{ср}}$	$\lambda_{\max}$	
1. Водоприймальники:				
-розтрубні	0,01	0,02	0,2	0,5
-ряжеві	0,01	0,02	0,1	0,5
-залізобетонні	0,005	0,01	0,05	0,5
2. Самопливні лінії				
-сталеві	0,1	0,25	0,40	0,5
-залізобетонні	0,2	0,40	0,60	0,5
3. Елементи свердловин:				
а) обсадні труби сталеві	0,1	0,12	0,16	0,5
б) фільтри:				
-дротяні	0,5	1,25	2,0	0,5
-каркасно-стержневі	0,2	0,30	0,5	0,5
-гравійні	0,1	0,2	0,3	0,5
в) заглиблені насоси:				
-ЭЦВ 8-40-65	1,2	1,4	1,6	2
-ЭЦВ 10-63-65	0,8	1,3	2,6	2
-ЭЦВ 10-120-160	2,0	2,5	4	2
4. Засувки з електродвигуном	0,1	0,6	1,0	4
5. Зворотні клапани	0,04	0,08	1,0	4



**Приклад 4.1.** Проектується свердловинний водозабір, що забезпечує водою споживача *I-ої категорії надійності*. Необхідно, щоб забезпеченість подачі води (при розрахунковій витраті  $200 \text{ м}^3/\text{год}$ ) гарантувалася протягом року не менш  $150 \text{ м}^3/\text{год}$ . В результаті вишукувань встановлено, що  $q_{\text{св.}} = 50 \text{ м}^3/\text{год}$ .

За розрахункову прийнята схема водозабору, яка складається із *чотирьох робочих й однієї резервної* свердловини. Конструкція свердловин передбачає влаштування *каркасно-стрижневого фільтра* на відмітці  $100 \text{ м}$ . У якості водопідйомного встаткування передбачена установка насосів **ЕЦВ10-63-65**. Кожна свердловина з'єднується з камерою перемикання *сталевим трубопроводом*  $D_y=100 \text{ мм}$ . Від камери перемикань до збірного резервуара передбачено прокласти *водовід* довжиною  $1 \text{ км}$  із *двох ліній*  $D_y = 300 \text{ мм}$  при розрахунковій витраті  $q = 14 \text{ л/с}$ . Необхідно оцінити ступінь відповідності прийнятої схеми водозабору вимогам СНиП 2.04.02-84 за умови, що ремонти будуть проводитися *однією бригадою* на водоводі при  $t_p = 24 \text{ год.}$ , а ремонт на свердловинах буде виконуватися виїзною бригадою **1 раз у тиждень** при  $t_p = 168 \text{ год.}$

Для оцінки надійності забору води приймемо наступні показники надійності обраних елементів — інтенсивність відмов насоса ЕЦВ10-65-65  $\lambda_2 = 1,69 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ ; обсадних труб свердловини довжиною  $100 \text{ м}$   $\lambda_3 = 0,6 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$ , водопідйомної труби  $\lambda_4 = 0,2 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}$ , фільтру  $\lambda_1 = 0,2 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ ; запірно-регулювальної арматури  $\lambda_5 = 0,1 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ .

Інтенсивність відмов **чавунних труб водоводу** довжиною  $1 \text{ км}$  прийнята  $\lambda = 0,8 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ .

При цих обмеженнях одержимо, що  $\lambda = 2 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ ,  $\lambda_e = 0,8 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ ,  $\gamma = 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $\gamma_e = 0,2 \cdot 10^{-2}$ .

Припустимо, що  $\alpha \rightarrow \infty$  тоді імовірність безвідмовної подачі водозабором у збірний резервуар протягом року  $q=150 \text{ м}^3/\text{год}$  при  $n=3$ ;  $m=2$  складає

$$P(t) = \exp\left\{-\frac{60 \cdot \lambda \cdot \gamma^2 \cdot t}{1 + 8 \cdot \gamma + 47 \cdot \gamma^2}\right\} \times \exp\left\{-\frac{2 \cdot \lambda_e \cdot \gamma_e \cdot t}{1 + 3 \cdot \gamma_e}\right\} =$$

$$= \exp\left\{-\frac{60 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \cdot 87600}{1,282}\right\} \times \exp\left\{-\frac{2 \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 87600}{1,006}\right\} = 0,92 \cdot$$

Дане значення  $P(t)$  свідчить про те, що протягом року будуть виникати аварійні стани водозабору, при яких він не забезпечить подачу  $150 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Отже, схема водозабору, обрана у відповідності з рекомендаціями СНиП 2.04.02-84, вимагає корегування. До додаткових заходів можна віднести:



- а) створення запасної ємкості, сполученої з резервуаром чистої води;  
б) збільшення числа резервних свердловин.

Тепер перейдемо до оцінки їхньої ефективності.

**Варіант А:** При визначенні обсягу запасної ємкості приймемо, що ремонтні роботи проводяться у всіх відмовних станах водозабірних свердловин. Крім того, якщо число аварійних свердловин перевищує розрахункове, що викликає зменшення витрати води, до рівня  $q < 150 \text{ м}^3/\text{год}$ , роботи з ліквідації аварій прискорюються, скорочуючись на кожній свердловині до **48 год**. При цих обмеженнях визначимо середній час перебування водозабірних свердловин в аварійному стані.

**Перший аварійний стан** має місце тоді, коли одночасно ремонтуються дві свердловини (одна за рахунок резерву й одна робоча), при цьому водозабір подає споживачеві  $150 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Тривалість перебування водозабору в цьому стані за рік складе :

$$t_1 = \frac{60 \cdot \gamma^3 \cdot t}{1 + 5 \cdot \gamma + 20 \cdot \gamma^2 + 60 \cdot \gamma^3 + 120 \cdot \gamma^4 + 120 \cdot \gamma^5} \cong 135 \text{ год.}$$

Таким чином, тривалість зниження подачі до встановленого рівня перевищує встановлене в СНиП 2.04.02-84 обмеження для споживачів 1-ї категорії надійності на 3 доб.

Нескладно визначити тривалість середнього часу перебування водозабору в наступному аварійному стані, коли одночасно ремонтуються три свердловини, а подана витрата знижується до **100 м<sup>3</sup>/год**. Вона становить близько **5 год**, що також перевищує нормативний час, протягом якого допускається зниження розрахункової витрати нижче встановленого рівня при подачі води споживачам **1-ої категорії** надійності. Тому можна прийняти даний аварійний стан за розрахунковий при визначенні **додаткового об'єму резервуара**. Тоді аварійний запас води, якому необхідно мати з умови забезпечення безперебійної подачі її споживачам, складе :

$$W_p = 0,5 \cdot q_{\text{розр}} \cdot t_p + 0,25 \cdot t_p = 100 \cdot 48 + 50 \cdot 48 = 7200 \text{ м}^3.$$

При наявності даного об'єму в резервуарі чистої води водозабір буде задовольняти вимогам, сформульованим СНиП 2.04.02-84 до надійності водопостачання. Тимчасовий резерв (додатковий аварійний запас води) дозволить у відведені терміни 48 год завершити ремонт і відновити відмовлені свердловини.

**Варіант Б:** Другий варіант підвищення надійності передбачає збільшення резерву до двох свердловин.

У результаті ймовірності безвідмовної подачі водозабором  $q > 150 \text{ м}^3/\text{год}$  зростає до:



$$P(t) = \exp - \left\{ \frac{360 \cdot \lambda \cdot \gamma^3 \cdot t}{1 + 9 \cdot \gamma + 60 \cdot \gamma^2 + 342 \cdot \gamma^3} \right\} \times \exp - \left\{ \frac{2 \cdot \lambda_e \cdot \gamma_e \cdot t}{1 + 3 \cdot \gamma_e} \right\} =$$

$$= \exp - \left\{ \frac{360 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 27 \cdot 10^{-6} \cdot 87600}{1,333} \right\} \times \exp - \left\{ \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 87600}{1,006} \right\} = 0,99 \cdot$$

При цьому середній час перебування водозабору в стані, коли подана водозабірними свердловинами витрата, становить менш 1 доб., що відповідає вимогам.

Для вибору остаточного рішення зіставимо їхні техніко-економічні показники. Оцінку проведемо по капітальних витратах. Прийемо вартість однієї свердловини (із трубопроводом до камери перемикання) 17 тис. грн., Вартість 1 м водоводу дорівнює 18 грн., а 1 м резервуара – 12 грн. При цьому витрати за **першим варіантом** складуть – 207 тис.грн.: вартість свердловин  $K_1=5 \cdot 17=85$  тис.грн.; кошторисна вартість водоводу  $K_2=18 \cdot 2=36$  тис.грн.

Вартість запасу води  $K_3=12 \cdot 7200=86$  тис.грн.

За **другим варіантом** витрати на створення водозабору менше (102 тис. грн), тому що немає необхідності створення аварійного запасу в резервуарах чистої води. Таким чином, обґрунтована розрахунком корегування схеми водозабору шляхом збільшення числа резервних свердловин до двох.

#### 4.7. Забезпечення надійності систем водопостачання на стадії проектування

При проектуванні технологічних систем (об'єктів), у тому числі і водопостачання, показники економічної ефективності, надійності і якості в загальному випадку можна виразити через систему цільових функцій:

$$\left. \begin{aligned} ППЗ_i &= E_n \cdot K_i + C_i; \\ P(t) &\geq P_{\min}; \\ \Pi_i(t) &\geq \Pi_{\min} \end{aligned} \right\}, \quad (4.47)$$

де перший вираз системи - загальні приведені затрати; другий — характеризує надійність об'єктів; третій — якість об'єкта,  $E_n$  — нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності;  $K_i$  — капіталовкладення на будівництво об'єкта;  $C_i$  — приведені річні експлуатаційні витрати для порівнювального варіанта;  $P_i(t)$  — показник надійності об'єкта (наприклад, імовірність безвідмовної



роботи, коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності); -  $P_{min}$  — мінімальний допустимий показник надійності об'єкта (системи), який забезпечує його окупність упродовж нормативного строку  $T_n$ ;  $P_{min}$  — допустимий мінімальний показник якості, який забезпечує ефективне використання об'єкта (системи).

Часто умова  $P(t) \geq P_{min}$  виконується тільки за рахунок надлишковості елементів (**резервування**).

Наприклад, для підвищення надійності подачі води насосними станціями встановлюють резервні насоси, що призводить до збільшення капітальних затрат і збільшення експлуатаційних затрат, пов'язаних із профілактичним обслуговуванням резервних агрегатів. У цьому разі, виконуючи оцінку порівнювальної ефективності об'єктів (систем), приведені затрати (ПЗ) потрібно звести до рівноцінних обсягів роботи (продукції). Наявність тотожності корисних результатів зводить усі розбіжності порівнюваних варіантів до однієї відмінності затрат, які зумовлені виробництвом продукції (роботи).

Ураховуючи імовірнісний характер порівнюваних обсягів продукції (роботи) при визначенні ППЗ, доцільно використати вираз:

$$ППЗ_i = \frac{1}{K_{np.i}} \cdot (E_n \cdot K_i + C_i) \rightarrow \min, \quad (4.48)$$

де  $K_{np.i}$  — коефіцієнт зведення обсягів продукції (роботи) для ймовірнісних обсягів

$$K_{np.i} = A_i \cdot P_i(t), \quad (4.49)$$

де  $A$  — обсяг продукції (роботи) імовірність отримання якого  $P_i(t)$ .

Залежність виду (4.49) характеризує фізичний мінімум, тобто пошук варіанта з найменшими витратами порівняно з іншими варіантами.

Розрахунок надійності на стадії проектування виконують для забезпечення технічних вимог на рівні надійності споруди, які встановлені державними чи галузевими стандартами, технічними умовами, нормативними документами із проведення планово-попереджувальних ремонтів, вимог споживачів, або замовників проекту. Номенклатуру показників надійності встановлює



організація, що розробляє технічне завдання на проектування, або модернізацію (реконструкцію) споруди (обладнання, машини, виробу).

Розрахунок надійності складних систем здійснюють по стадійно (на стадії технічного завдання, технічного та робочого проекту). На стадії технічного завдання визначають три показники надійності для споруди (пристрою, виробу) у цілому й окремо гамма-відсотковий ресурс  $T_{p,\gamma}$ ; середній ресурс  $T_{p,сep.}$ ; імовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  (лише для споруд (пристроїв, виробів третьої групи, що пов'язано з безпекою для життя людини). На стадії технічного проекту показники уточнюють для складальних одиниць і деталей, вузлів розраховуючи їх для кожного конструктивного елемента. Крім того, на стадії технічного проекту розраховують додатково ще й середній термін служби  $T_{сл,ср.}$ ; гамма-відсотковий термін служби  $T_{сл,\gamma}$ ; напрацювання на відмову  $T_{від.}$ ; коефіцієнт готовності  $K_g$ ; коефіцієнт технічного використання  $K_{т.в.}$ .

Усі показники, окрім «напрацювання на відмову», розраховують для машин (обладнання, споруд) у цілому, а «напрацювання на відмову» — тільки для складальних одиниць.

Основну номенклатуру показників надійності та почерговість розроблення їх по стадіях проектування наведено в табл.4.6.

Усі показники надійності визначають на період експлуатації споруди до першого капітального ремонту (реконструкції), а якщо споруда не підлягає капітальному ремонту, то до її ліквідації й списання. Коефіцієнт технічного використання, як правило, встановлюють для споруди з безперервним режимом роботи. Для простих виробів, що не мають у складі самостійних складальницьких одиниць, розрахунок надійності на стадіях технічного завдання та технічного проекту однаковий.

На стадії робочого проекту встановлюють вимоги до показників надійності окремих елементів споруди для забезпечення заданих імовірностей гарантованого неруйнування їх у конкретних умовах експлуатації за встановленими режимами навантаження. У разі необхідності виконують корегування значень нормованих показників надійності. Результати розрахунку надійності контролюють під час повузлових випробувань, на надійність і в підконтрольній експлуатації серійних виробів.



Номенклатура показників надійності

Показник	Умов-не позначення	Технічне завдання		Технічний проект		
		Споруда	Складальницький елемент	Споруда	Складальницький елемент	Деталь
Гамма-відсотковий ресурс	$T_{p.y}$	+	+	-	+	+
Середній ресурс	$T_{p.cр.}$	+	+	-	+	+
Середній термін служби	$T_{cл.cр.}$	-	-	+	-	-
Гамма-відсотковий термін служби	$T_{cл.y}$	-	-	+	-	-
Напрацювання на відмову	$T_{від.}$	-	-	+	+	-
Коефіцієнт готовності	$K_c$	-	-	+	-	-
Коефіцієнт технічного використання	$K_{т.в.}$	-	-	+	-	-
Імовірність безвідмовної роботи	$P(t)$	+	+	= -	-	+
Питома трудоемкість технічної експлуатації	$S_c$	+	-	+	-	-

Метою розрахунку на стадії технічного проектування є з'ясування призначення вимог ресурсних показників деталей (елементів) та узгодження їх з вимогами до надійності складальних одиниць.

Крім цього на стадії технічного проектування мають бути визначені показники надійності споруд у відповідності до переліку, який наведений у табл.4.6, а також остаточно встановлені періодичність та тривалість планових обслуговувань і ремонтів.

Вихідними даними для проведення розрахунків є середні гамма-відсоткові ресурси складальних одиниць і відповідні їм значення ймовірностей  $\gamma_i$ , визначені на стадії технічного завдання.

Розрахунок виконують у такій послідовності:

1) складають структурну схему надійності складальницької одиниці та структурно-логічну формулу;



2) визначають вимоги до гамма-відсоткових і середніх ресурсів деталей;

3) визначають систему планово-попереджувальних ремонтів і технічного обслуговування з урахуванням періодичності та складу ремонтних робіт;

4) встановлюють перелік деталей (елементів), які замінюються при кожному виді ремонту.

Якщо споруда або технологічна система (наприклад, насос, електродвигун, трубопроводи обв'язки) складається з кількох самостійних складальницьких одиниць, то попередньо складають структурну схему для споруди, а в подальшому – структурну схему зокрема, для кожної складальницької одиниці. При цьому значення ймовірностей забезпечення ресурсу кожної складальної одиниці слід приймати за структурною схемою надійності окремого вузла, а не споруди в цілому.

#### Контрольні запитання

1. Назвіть параметри експлуатаційної надійності системи водопостачання.

2. В чому полягає детерміністична модель надійної водоподачі системою?

3. Чим відрізняються системи комунального і промислового водопостачання з точки зору їхньої надійності?

4. Як визначається вірогідність забезпечення споживачів водою системою водопостачання?

5. Класифікація систем водопостачання за ступенем їхньої надійності

6. У яких станах може перебувати система водопостачання?

7. На які категорії поділяє системи водопостачання сучасна нормативна література?

8. Які гідрологічні характеристики поверхневого джерела гарантовано забезпечують його надійність?

9. Яку роль відіграє розрахунок і статус показників водного балансу на надійну забезпеченість учасників ВГК водними ресурсами?

10. Які статті водного балансу вважають прибутковими, а які видатковими?

11. Як визначити мінімально припустимий рівень забезпечення подачі води водозабірними спорудами?

12. Що таке логічно-структурна схема водозабірних споруд і який порядок її складання?

13. Як визначити основні показники надійності резервованої системи водозабірні споруди?

14. Які критерії відмови водозабірних споруд?



## 5. КРИТЕРІЇ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ВОДИ Й СТІЧНИХ ВОД

### 5.1. Формування розрахункових витрат води і стічних вод

При проведенні розрахунків і проектуванні систем подачі і розподілу води (СПРВ) та систем водовідведення одними із головних параметрів є «розрахункові витрати»  $Q_{розр.}$ , від яких залежать правильний вибір: діаметрів труб, ( $d_y$ ); визначення робочих параметрів насосів ( $Q_{НС}, H_{НС}$ ), і відповідно, будівельні розміри насосних станцій; об'єми РЧВ ( $W_{РЧВ}$ ), водонапірної башти ( $W_{ББ}$ ), накопичувальних резервуарів; витрати електроенергії, і відповідно, затрати коштів на її сплату, а значить собівартість 1 м<sup>3</sup> поданої води ( $C_a$ ) тощо.

Діючі нормативи (СниП) [25, 26] передбачають розрахунки систем на подачу або відведення «максимальних» витрат води. Ці витрати визначаються на основі питомих витрат, які приймаються окремо для господарсько-питних потреб населення, підприємств, для забезпечення водою колективних і фермерських господарств та сільгоспідприємств, поливання територій. Для водопостачання й для водовідведення розрахункові максимально годинні витрати є однаковими для господарсько-питного та виробничого водоспоживання. Крім того, при розрахунках водоспоживання потрібно враховувати витрати води на поливання та пожежогашіння.

Уважається, що подача  $Q_{макс.}$  дозволить забезпечити і середні ( $Q_{ср.}$ ) і мінімальні ( $Q_{мін}$ ) витрати води. В такому випадку повторюваність максимальнодобових витрат на протязі року буде  $P = 1/365 = 0,0028$ , а в перспективі кількох років ще менше. Для максимально годинної витрати цю повторюваність потрібно поділити ще на 24 і вона буде складати 0,00011. У разі виникнення пожеж (наприклад, для  $n_{поже.} = 2$ )  $P \leq 0,000001$ . Це дуже мала ймовірність появи випадкової події. Взагалі при розрахунках використовуються методики розрахунку за  $Q_{макс.}$  і  $Q_{мін}$  при встановленому рівні їхньої забезпеченості  $P_0$ . Існують дві групи методів визначення «розрахункових витрат» детермінативні (визначальні); імовірнісні (прогнознi). Для всіх методів спільним є те, яким чином пропонується визначати розрахункову витрату





$$Q_p = K_p \cdot Q_{cp}, \quad (5.1)$$

де

$$Q_{cp} = N \cdot q, \quad (5.2)$$

де  $N$  — кількість споживачів  $i$ -го виду (нормується по факту, або прогнозним розрахунком);  $q$  — питоме водоспоживання (приймається на основі нормативів, або статистичних даних);

$K_p$  — коефіцієнт добової нерівномірності водоспоживання, (визначається залежно від методу розрахунку розрахункових витрат) і знаходиться в межах:

- за СніП 2.04.02-84 [25] для господарсько-питних потреб населення (визначальний метод)  $K_{добр.макс.} = 1,1...1,3$ , а для годинних витрат —

$$K_{год.макс.} = \alpha_{макс.} \cdot \beta_{макс.} \quad (5.3)$$

- в імовірнісних методах  $K_p = f(Q_{ст}, P)$ .

Імовірнісні методи мають більше переваг щодо точності результатів і висновків. Зокрема, імовірнісні методи враховують місцеві фактори впливу на процеси подачі води в кожному конкретному випадку експлуатації СПРВ. Це пов'язано з тим, що розрахунки базуються на результатах статистичних даних, отриманих у наслідок багаторічних спостережень.

Указані вище чисельні показники нерівномірності водоспоживання можуть бути віднесені тільки до об'ємів води, що витрачаються власне на господарсько-питні потреби населення в житлових будинках або на підприємствах громадського харчування й побутового обслуговування. Наведені в СніП [25] чисельні показники об'ємів і режимів споживання води базуються на деякому фактичному матеріалі, проте вони не можуть претендувати на достатню точність, оскільки не є результатом математичної обробки й аналізу дослідних даних конкретного об'єкта.

Практика вимірів витрат води в процесі експлуатації міських водопроводів дає можливість визначити, у кращому випадку, тільки загальні кількості води, що подаються в окремі періоди насосними станціями в міську мережу. Але, та обставина, що в окремі періоди доби частина цієї води надходить у регулюючі ємкості, а в інші періоди відбирається з них у мережу (на додаток до води, що подається від насосних станцій), зазвичай не



враховується. Недостатньо враховуються й витрати води на поливальні потреби, далеко не точно враховуються витрати на потреби промисловості, і вельми довільно приймаються розміри витоків (втрат) води. Графіки добових коливань витрати води для міста приймаються за аналогією із графіками, знятими з «натури» в інших містах. Кількість таких «типових» графіків-аналогів, використовуваних у практиці, дуже незначне, і самі графіки, як уже указувалося, не можуть достатньо вірно відображати «дійсну картину» водоспоживання. Ніяка імовірнісна оцінка «типових» витрат і ступеня їхнього забезпечення не може бути прийнята при використанні вказаних даних.

Приток стічних вод у колектори водовідведення відбувається з великою нерівномірністю в різні тимчасові інтервали: по годинах доби, по днях тижня, протягом доби й протягом години. Проте оскільки переповнення колектора внаслідок недостатньої пропускної спроможності є відмовою системи водовідведення, то розрахунок його на сьогодні ведуть виходячи з максимальної годинної витрати в добу максимального водовідведення, вірогідність якого не перевищує 10 %. Інакше кажучи, система водовідведення близько 90% часу функціонування має ту, чи іншу надмірність пропускної здатності, величина якої змінюється пропорційно притоку стічних вод. Позначимо через  $q$  — приток у момент часу  $t$ , м<sup>3</sup>/год.;  $q_{max(m)}$  — максимальна годинна притока в добу максимального водовідведення, м<sup>3</sup>/год;  $q$  — середня годинна притока в добу максимального водовідведення, м<sup>3</sup>/с;  $q_{min}$  — мінімальна годинна притока, м<sup>3</sup>/год.

Для визначення числової характеристики надмірності пропускної спроможності в  $t$ -й момент часу введемо поняття коефіцієнт надмірності  $K_t^{над}$ , який характеризується співвідношенням

$$K_t^{над} = \frac{Q_{max}}{q_t}, \quad (5.4)$$

де  $Q_{max}$  — максимальна пропускна спроможність системи, м<sup>3</sup>/год.

При  $q_t = Q_{max}$ ,  $K_t^{над} = 1$ , а при  $q_t = q_{min}$ , тоді  $K_t^{над}$  приймає своє максимальне значення  $K_{t,max}^{над}$ .



Таким чином, величина  $K_t^{над}$  постійно змінюється протягом часу в межах інтервалу  $K_{t,max}^{над} \geq K_t^{над} \geq 1$ .

Усе викладене відноситься в пешу чергу до надмірності системи водовідведення в цілому, яка досягається різними формами та ступенями надмірності її складових елементів.

Нормативні дані дозволяють принципово визначати «нормальні рівні» функціонування системи водозабезпечення в цілому, тобто рівень задоволення потреб у воді обслуговуваного об'єкту. Дані по припустимому зниженню нормального рівня водозабезпечення, яке може мати місце в результаті випадкових подій наведено (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

## Нормативи якості функціонування систем водопостачання

Найменування нормативу	Величини нормативів для категорій систем водопостачання		
	I	II	III
1. Чисельність населення, відповідна категорії, осіб.	більш 50 тис.	5-50 тис.	до 5 тис.
2. Тривалість 30-відсоткового скорочення розрахункової подачі води, діб.	до 3	до 10	до 15
3. Тривалість повного припинення подачі води або зниження подачі води більш ніж на 30%*	до 10 хв.	до 6 год.	до 24 год.

Якщо зниження буде більше ніж вказано в п.3 табл. 5.1, то це означає система переходить в стан відмови. Для водоспоживання на промислові потреби нормативи встановлюються відомчими технічними умовами або аварійним графіком роботи підприємств.

Очевидно, що викладені вимоги відносяться не стільки до надійності систем водопостачання, скільки до оцінки припустимого зниження якості їх функціонування. Ніяких власне, надійнісних розрахункових характеристик, тобто оцінки нормативних значень вірогідності безвідмовної роботи систем або припустимої частоти повторення відмов, що призводять до вказаних порушень функціонування систем, в СНиП [25,26] не



наведено. Нормативи припустимої тривалості порушень стосуються тільки процесів відновлення систем водопостачання при будь-яких порушеннях їхньої роботи.

Для систем виробничого водопостачання з детермінованим керованим процесом водоспоживання припустимі зниження рівня визначаються по відношенню до нормального розрахункового рівня. Для систем водопостачання міст із випадковим процесом водоспоживання точне визначення припустимого (за нормами) зниження рівня водоспоживання не є можливим. Він може бути оцінений лише з деякою мірою вірогідності (забезпеченості) залежно від імовірнісної оцінки подій, які можуть спричинити подібне зниження. Це стосується також господарсько-питних водопроводів на підприємствах. За відсутності таких імовірнісних оцінок визначення допустимого розрахункового рівня функціонування систем водопостачання може бути отримане приблизно шляхом введення нормативної поправки (30%) до розрахункового рівня функціонування в дні та години найбільшого водоспоживання.

Використання резервів насосного встаткування й напірно-регульовальних ємкостей, як правило, дозволяють для будь-якого моменту роботи систем господарсько-питного водопостачання, що діють, забезпечити заплановану подачу найбільшої годинної витрати. Забезпечення рівня функціонування системи в стані одночасного задоволення потреб при пожежогасінні й постачання споживачів досягається використанням передбачених пожежних запасів води в резервуарах і наявністю додаткового насосного встаткування стаціонарних насосних станцій, а також спеціального протипожежного пересувного встаткування, що використовується пожежною командою. Визначення розрахункових термінів гасіння пожежі й потрібної інтенсивності подачі води для цих цілей засноване на довголітніх статистичних матеріалах і дозволяє вирішувати ці завдання з достатньою гарантією необхідної забезпеченості.

## **5.2. Спостереження за режимом подачі води**

Виявлення дійсної картини процесу водоспоживання в експлуатованих системах комунального водопостачання є єдиним



шляхом для отримання чисельних характеристик основної функції цих систем, тобто функції забезпечення водою населення.

Проведення натурних вимірів на ряді водопроводів, що діють, і обробка результатів спостережень дозволяють отримати фактичні величини годинних і добових об'ємів споживання води і режими її витрачання.

Кінцевою ж метою натурних досліджень процесу водоспоживання є ідентифікація законів розподілу витрат і їхньої забезпеченості, що дозволяє встановити відповідність прийнятих розрахункових витрат необхідній надійності функціонування системи водопостачання. Натурні виміри повинні проводитися в містах із різною чисельністю населення, розташованих у різних кліматичних зонах, що мають різний ступінь розвитку промисловості. Це дозволяє врахувати вплив усіх цих особливостей на чисельні показники водоспоживання.

Для отримання чисельних характеристик фактичного режиму водоспоживання (нерівномірності водоспоживання за годину, за добу) виміри повинні проводитися в різні години доби для різних днів тижня й у різні сезони року. Основними об'єктами обстежень є житлові масиви, окремі житлові будівлі, групи будівель із різною поверховістю, різним ступенем санітарно-технічного обладнання, будинки повинні мати різний ступінь заселеності помешкань. При обстеженнях необхідно реєструвати витрати води, тиск води на введеннях води в будівлі й температуру повітря. Важливо виявити фактичні нераціональні витрати води (в першу чергу витоки).

Непродуктивні витрати води, що мають місце в житловій забудові фактично неможливо врахувати в процесі обстеження, і вони можуть бути виявлені лише випадково. Наявність витоків спотворює показники дійсної нерівномірності споживання води.

Об'єми витоків, що обумовлені, головним чином, несправністю водорозбірної арматури, у значній мірі залежить від величин тисків у мережі. Для оцінок фактичних величин витоків у системах водопроводів житлових будівель проводять спеціальні вибіркові дослідження, визначаючи об'єми водоспоживання в різних будівлях при вимкнених водорозбірних кранах у різні періоди доби, дні тижня, пори року й навіть у різні роки. Отримані дані спостережень дозволяють отримати оцінку фактичної величини витоків усереднено.



Натурні виміри дають можливість визначити дійсні величини годинних і добових витрат води в житлових будівлях, коефіцієнти нерівномірності відповідно в межах доби (годинні) і в межах року (добові). Вибір житлових масивів повинен проводитися з мінімальною наявністю в них виробничих і громадських будівель. Аналогічні натурні виміри повинні бути проведені окремо для громадських будівель і підприємств побутового обслуговування.

Разом із проведенням спеціальних натурних обстежень і заміру, доцільне вивчення, і аналіз наявних статистичних та звітних даних по експлуатації обстежуваних міських водопроводів. Ці дані дозволяють провести деякі зіставлення їх із результатами фактичних вимірів, а також отримати відомості про об'єми й режими витрачання води на потреби промислових підприємств міста, поливання вулиць і зелених насаджень, і оцінити вплив цих витрат на загальні показники нерівномірності водоспоживання міста в цілому. Крім того, аналіз звітних даних є єдиним джерелом отримання репрезентативних даних про питоме споживання води на одного жителя в різних житлових зонах міста.

Таблиця 5.2  
Структура витрат води, %, у населених пунктах України

№ з/п	Населений пункт	Населення	Бюджетні установи	Інші (промисловість, ТКЕ)	Необліковані витрати
1	Рівне	60	12	4	24
2	Ужгород	40	17	5	38
3	Кіровоград	39	3	9	49
4	Івано-	32	4	16	48
5	Тернопіль	50	4	8	38
6	Чернігів	61	7	8	24
7	Харків	62	3	5	30
8	Чернівці	40	4,5	7,5	48

Для виміру витрат води можуть використовуватися як стаціонарні водоміри, так і переносні лічильники різних типів. Використовуються також автоматичні прилади, що проводять безперервний запис величин миттєвих витрат, які змінюються в часі. Здійснення вимірів фактичних витрат супроводжувалося



проведенням анкетного опитування жителів про ступінь задоволення їхніх потреб у воді.

Зазвичай передбачається, що повторне спостереження за режимом водоспоживання приводить до результатів, відмінних від попередніх, і це дає підставу для оцінки його як випадкового процесу. Результат будь-якого спостереження є лише однією із численних можливих реалізацій випадкового процесу.

Вибір методу реєстрації й методики обробки отримуваних результатів спостережень випадкового процесу в значній мірі залежить від його характеру й від поставлених завдань. Зазвичай виділяють наступні основні етапи аналізу статистичних даних: збір і реєстрація початкових даних; підготовка для обробки; оцінка основних характеристик процесу; аналіз отриманої інформації.

Методи, які використовуються для вивчення випадкових процесів, поділяються на методи аналізу окремих реалізацій; методи аналізу ансамблю реалізацій при відомих статистичних оцінках і параметрах окремо узятій реалізації (рис. 5.1).

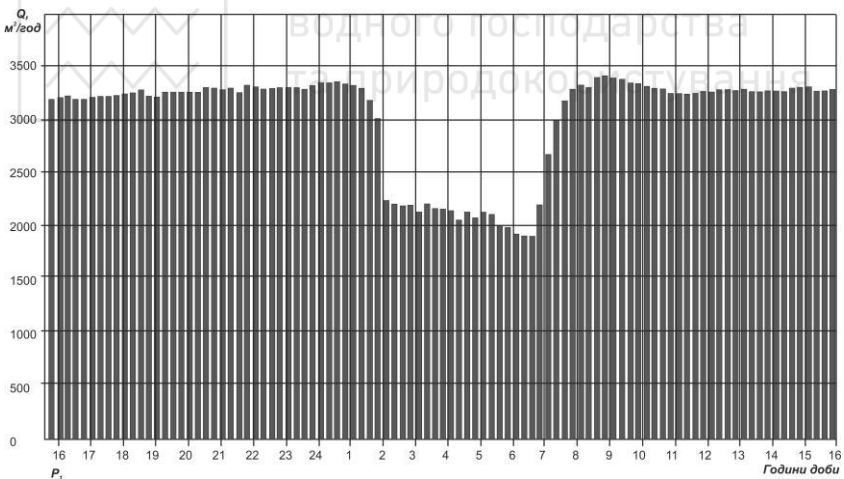


Рис. 5.1. Зміна витрат води поданої в СПРВ (м. Івано-Франківськ, 14..15.10.2003

У ході натурних досліджень визначаються основні режими роботи СПРВ, на які впливають процеси розбору і подачі води в СПРВ. Досвід таких досліджень показує, що на процеси розбору



води з системи подачі і розподілу води впливає дві групи факторів: природно-демографічні, техніко-економічні.

До природно-демографічних факторів слід віднести :

- ✚ соціально-демографічний склад водоспоживачів, їх кількість та розміщення на території об'єкта водопостачання;
- ✚ пори року, доби, день тижня, святкові або будні дні;
- ✚ географічна широта, кліматичні умови (температура повітря, вологість);
- ✚ культура водокористування тощо.

Сукупність цих факторів визначає величину «корисного» водоспоживання (задоволення господарсько-питних потреб та культурних запитів населення)

Техніко-економічні фактори можуть включати:

- ступінь санітарного благоустрою житла мешканців;
- техніко-організаційний рівень обліку води;
- тарифи на воду;
- склад споруд СПРВ та їхній технічний стан;
- графіки подачі води, що склалися;
- напори у водопровідній мережі тощо.

Вище наведені фактори можуть впливати як на корисну складову водорозбору ( $Q_{кор.}$ ), так і на величини втрат води ( $Q_{вит.}$ ) і нерациональне водокористування ( $Q_{нерац.}$ ). Цілком очевидно, що водоспоживання та пов'язані з ним процес розбору води з мережі носить імовірнісний (стохастичний) характер (рис. 5.1), а його нерівномірність може бути визначена методами математичної статистики ґрунтуючись на стандартній теоретичній функції розподілу Лапласа виду  $\Phi = f(q)$ ; математичному сподіванні  $\bar{q}$ ; імовірності забезпеченості  $P_0$ .

### 5.3. Визначення імовірностних значень водорозбору

Імовірність витрат води  $P$  — це імовірність того, що значення витрат води, які розглядаються, не буде перевищене серед сукупності всіх можливих її значень протягом розрахункового періоду. У той же час, забезпеченість  $P_0$  — це імовірність перевищення цього значення, тобто суть зворотня випадкова подія може статися:





$$P_0 = 1 - P_i, \quad (5.5)$$

$$\begin{cases} P = \int_0^q f(q) \cdot dq \\ \bar{q} = \int_0^q q \cdot f(q) \cdot dq \end{cases} \quad (5.6)$$

Для кожної категорії систем водопостачання нормами визначено рівні забезпеченості (табл. 5.3) і при цьому  $P_0$  збільшується зі зменшенням розмірів населеного пункту й відповідно категорії системи, для добових витрат це значення більше ніж для годинних.

Таблиця 5.3

Рівні забезпеченості  $P_0$  для витрат  $Q_p$  води залежно від категорії надійності системи водопостачання

Категорія системи	$P_0$ для витрат	
	добових	погодинних
1	0,01	0,005
2	0,03	0,01
3	0,04	0,015

Коефіцієнт добової нерівномірності постійно змінюється за дослідженнями Ткачука О.А.[28] та наближається до нормального закону розподілу (рис. 5.2). Значення коефіцієнта нерівномірності суттєво залежить від продуктивності системи, тобто її розрахункової максимальної подачі

$$K_{\text{год.макс}} = a + \frac{b}{\sqrt{Q_{p.\text{доб.}}}}, \quad (5.7)$$

де  $a, b$  — коефіцієнти, що залежать від рівня забезпеченості витрат, тобто  $a=f(P_0)$   $b=f(P_0)$

Коефіцієнт добової нерівномірності

$$K_{\text{доб.макс.}} = 1,3 + \frac{20}{\sqrt{Q_{\text{доб.макс.}}}} \quad (5.8)$$

Результати досліджень нерівномірності споживання води наведено на рис. 5.2; 5.3; 5.4.

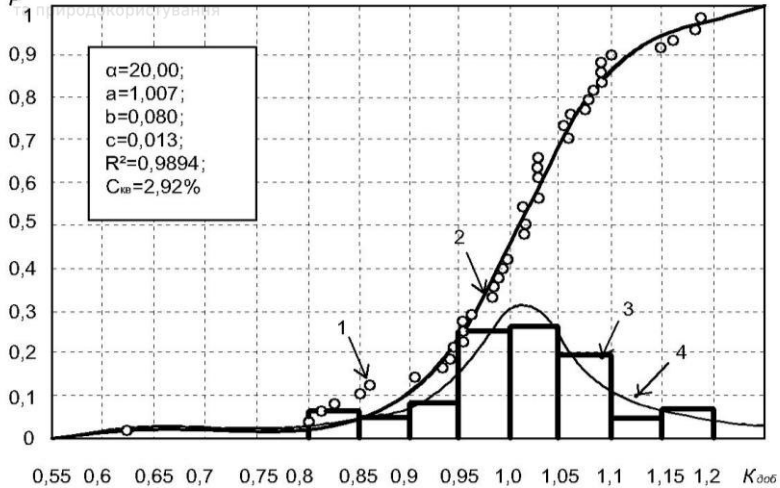


Рис. 5.2. Наближений до нормального розподіл коефіцієнтів добової нерівномірності подачі води  $K_{доб}$  (за даними досліджень Ткачука О.А.) [28]

Алгоритм проведення ймовірнісного аналізу статистичних даних водоспоживання включає такі етапи :

1) Отримують масив витрат води за весь період спостережень;  $m = q_1, q_2, \dots, q_i$ . Кількість значень  $q_i$  планується в результаті «планування експерименту». Отриманий масив розбивається на рівні проміжки в часі  $t$ .

2) Всі витрати розташовують в порядку їх зростання;

3) Визначають імовірність появи випадкової події – витрати  $q_i$ .

$$P = \frac{m_i}{\sum_1^M m_i} = \frac{1}{M}, \quad (5.9)$$

де  $M$  – кількість елементів масиву.

4) Будується інтегральний графік розподілу витрат виду функції  $\Phi_o(x)$  нормального розподілення (Рис. 5.3).

5) Визначають коефіцієнти нерівномірності подачі води (чи то розбору води)

$$K = \frac{q}{q}, \quad (5.10)$$



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

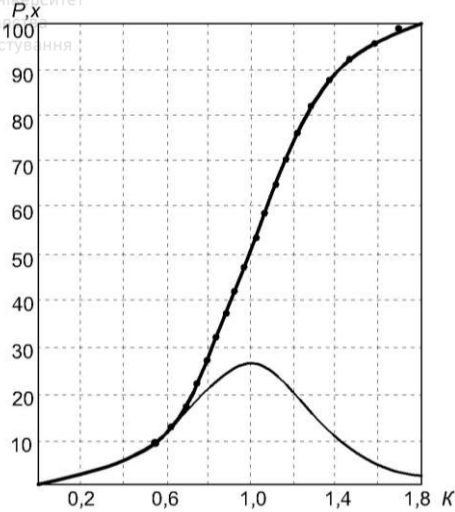


Рис. 5.3. Інтегральний розподіл витрат води. Значення функції  $\Phi_0(x)$  нормального розподілення

Таблиця 5.4

Результати розрахунку розподілу витрат води і значення функції  $\Phi_0(x)$  нормального розподілення.

№ п/п	Витрати води, $q$ , л/с	Коефіцієнт нерівномірності, $K$	Кількість повторів, $n$	Імовірність появи		Відхилення розрахунку, $\Theta$ , %
				$P_e$	$P_p$	
1	0,95	0,32	1	0,02	0,03	1,1
2	1,25	0,42	1	0,04	0,05	1,03
3	1,45	0,48	1	0,06	0,07	0,9
4	1,59	0,53	1	0,08	0,09	0,57
5	1,72	0,57	1	0,1	0,1	0,44
6	1,83	0,61	1	0,12	0,12	0,21
7	1,92	0,64	1	0,14	0,14	0,02
8	2/01	0,67	1	0,16	0,16	-0,17
9	2,09	0,69	1	0,18	0,18	-0,29
...	...	...	...	...	...	...
47	4,55	1,52	1	0,94	0,93	-0,9
48	4,75	1,58	1	0,96	0,95	-1,03
49	5,05	1,68	1	0,98	0,97	-1,1
$Q_{ср}$	3	$R_{kr} = 0,999$	$\alpha = 5,04$			$\bar{S} = 0,57$



Коефіцієнти також розміщують у порядку їхнього зростання. Наведені нижче експериментальні графіки показують значну розбіжність коефіцієнтів нерівномірності із отриманими визначально.

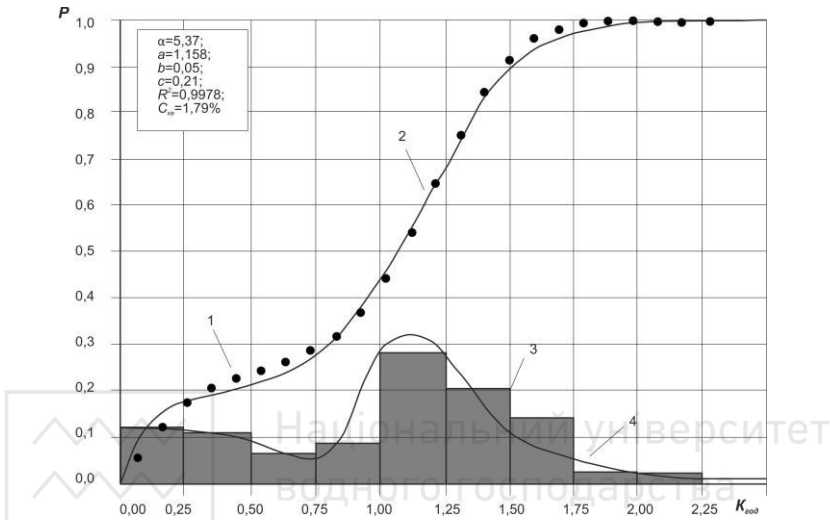


Рис. 5.4. Дволіковий графік розподілу коефіцієнтів погодинної нерівномірності водоспоживання  $K_{\text{год}}$  (8673 вимірів протягом року) (за даними досліджень Ткачука О.А.) [28]

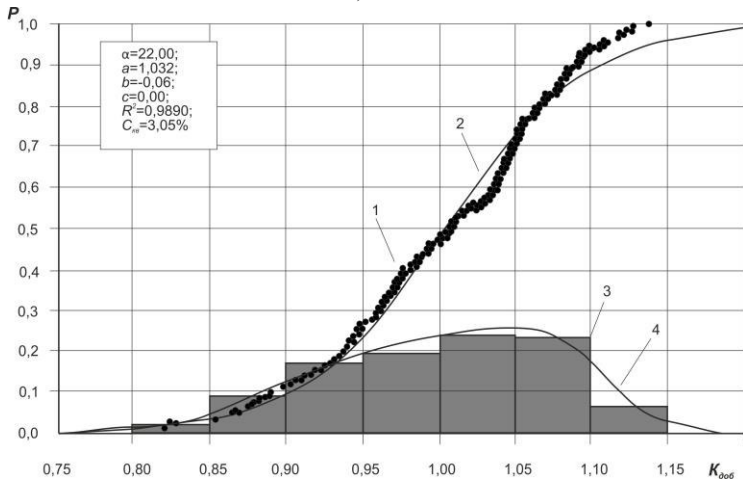


Рис 5.5. Зміщений вправо графік добової нерівномірності водоспоживання  $K_{\text{доб}}$  (151 вимір протягом 5 місяців, м. Івано-Франківськ) (за даними досліджень Ткачука О.А.) [28]

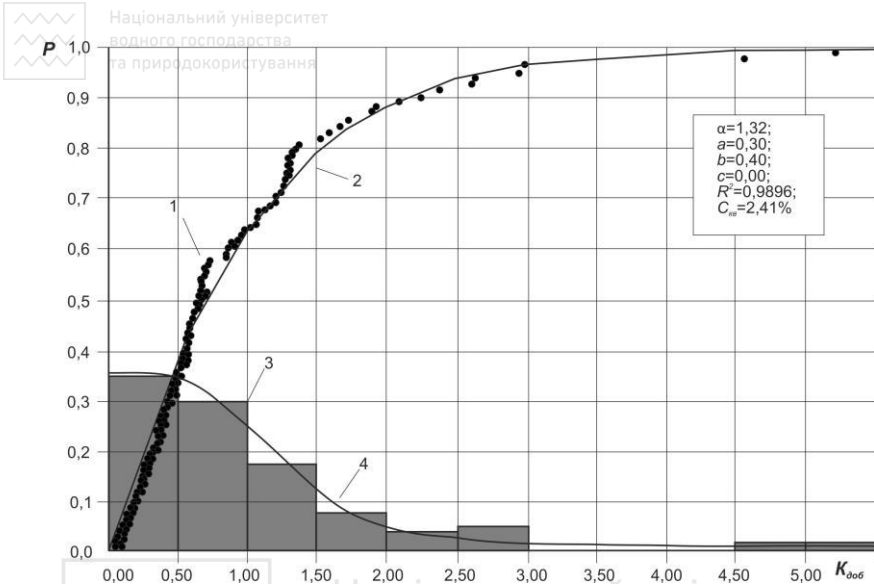


Рис. 5.6. Зміщений вліво графік розподілу коефіцієнтів добової нерівномірності водоспоживання  $K_{доб}$  (81 доба, житловий будинок м. Рівне) (за даними досліджень Ткачука О.А.) [28]

Для практичних розрахунків отримуємо аналітичний вираз функції інтегрального розподілу витрат води в СПРВ, що базується на функції гіперболічного виду ( $tg$ ), яка має вигляд

$$P = \frac{e^{\alpha(K-a)} + c}{e^{\alpha(K-a)} + e^{b/K}}, \quad (5.11)$$

де  $a, b, c$  – коефіцієнти, що залежать від виду інтегральної кривої розподілу (варіації) та її зміщення (асиметрії) і визначаються шляхом апроксимації.

Якщо розподіл витрат води наближений до теоретичного (нормального) розподілу, або якщо проводиться статистичне обґрунтування максимальних коефіцієнтів нерівномірності водорозбору, то допустимо застосувати більш просту формулу (5.12), яка цілком відповідає формулі (5.11) при  $a=1, b=c=0$ .

$$P = \frac{e^{\alpha(K-a)}}{e^{\alpha(K-a)} + 1}. \quad (5.12)$$

У цьому випадку залежність імовірності водорозбору від коефіцієнтів його нерівномірності визначають тільки за допомогою

параметра  $\alpha$ , який, в свою чергу, залежить від коефіцієнта варіації  $\alpha=f(C_v)$  (див. формулу 5.13).

$$\alpha \approx \frac{1,8}{C_v}, \quad (5.13)$$

де  $C_v$  — коефіцієнт варіації (дисперсія розподілу).

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (K_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (5.14)$$

де  $K_i$  — коефіцієнти нерівномірності, що визначають на основі експериментальних даних за формулою (5.10).

Вигляд цієї функції дозволяє нам для будь-яких функцій розподілу описувати набір статистичних даних, що характеризують реальний процес подачі води (чи розбору) у СПРВ. У разі забезпеченості практично всіх споживачів водою зі СПРВ графіки водоспоживання мають розподіл наближений до «нормального» закону й при цьому розрахункові значення коефіцієнтів нерівномірності можуть визначатись за спрощеною формулою

$$K_p = 1 + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{1 - P_0}{P_0}\right), \quad (5.15)$$

Як уже указувалося, порушення може полягати в деякому неприпустимому зниженні рівня водозабезпечення (часткова відмова), або в повному припиненні подачі води споживачам (повна відмова). Відмова системи може також полягати в неприпустимому погіршенні якості води, що подається (аварія, екологічна катастрофа). Слід зазначити, що вірогідність безвідмовної дії більш придатна для оцінки надійності невідновлюваних систем.

Для відновлюваних систем водопостачання рекомендується використовувати більш складний параметр – показник якості функціонування, наприклад, фактичну годинну витрату води.

При цьому, кожному стану мережі  $\bar{x}(t)$  відповідає максимальна годинна витрата води, а через неї  $\Phi_x(t)$ . Ця витрата залежить тільки від фактичного стану системи, і дає чисельну характеристику ступеня виконання завдання. При різних станах системи відключаються певна кількість споживачів, і сумарний дефіцит подачі води визначає характер зниження й показника якості



функціонування. Якщо позначити розрахункову витрату води, яку подає справна система через  $Q_0$ , дефіцит у забезпеченні водою відключеним споживачам у стані  $\bar{x}(t)$  позначити через  $\Delta Q_x$ , тоді вираз показника якості функціонування матиме вигляд

$$\Phi_x(t) = Q_0 - \Delta Q_x. \quad (5.16)$$

Показником надійності системи  $R_{cucm}(t)$  є співвідношення показника якості реальної системи  $\Phi_x(t)$  до показника якості функціонування ідеальної (повністю справної) системи  $\Phi_0(t)$ .

$$R_{cucm}(t) = \frac{\Phi_x(t)}{\Phi_0(t)} = \frac{Q_0 - \Delta Q_x}{Q_0} \leq 1. \quad (5.17)$$

Аналогічно можна представити показник якості функціонування по величині витрати  $Q$  і напору води  $H$  й відповідності його заданим значенням, а далі показник надійності.

У системах водопостачання й водовідведення аналогом показників надійності системи можуть уважатися коефіцієнти забезпеченості витрати  $\alpha_3$  і напору  $\beta_3$ :

$$\alpha_3 = \frac{Q_{ав.}}{Q_p}, \quad (5.18); \quad \beta_3 = \frac{H_{ав.}}{H_p}, \quad (5.19)$$

де  $Q_p$ ,  $H_p$  — витрата і напор в системі водопостачання при розрахунковому режимі роботи; %,  $Q_{ав.}$ ,  $H_{ав.}$  — витрата і напор в системі водопостачання при аварійному режимі.

Група суто технічних факторів (конструктивна (структурно-логічна) схема СПРВ, технічний стан трубопроводів, споруд і обладнання, рівень профілактичного та аварійно-відновлювального обслуговування) визначає технічну здатність системи забезпечувати споживачів водою. Ця здатність характеризується ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$  та коефіцієнтом готовності  $K_z$  з алгоритму їхнього визначення очевидно, що вони близькі за суттю. Так,  $P(t)$  — ймовірність того, що протягом часу  $t$  система або її елемент зберігатиме свої робочі параметри в допустимих межах;  $K_z$  — ймовірність того, що виріб (елемент) знаходиться в придатному до роботи за призначенням стані в будь-який момент часу, якщо періоди роботи (напрацювання на відмову  $T_0$  і відновлення  $T_e$  розташовані послідовно одне за одним. На відміну від ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$ , яка із збільшенням часу  $t$  зменшується,

коefficient готовності  $K_2$  відновлювального обладнання, яким є елементи СПРВ, набуває стаціонарного характеру.

Це зумовлено тим, що потік відмов і відновлення стає рівноваженим. У межах часу напрацювання на відмову  $T_0$  вони практично рівні

$$K_2 \approx P(T_0), \quad (5.20)$$

Дослідженнями встановлено, що величина рівня забезпеченості залежить від такого показника надійності як «коefficient готовності» системи:

$$P_0 = f(K_2), \quad (5.21)$$

де  $K_2$  – coefficient готовності системи, або імовірність того, що система буде виконувати поставлену задачу водозабезпечення

Це підтверджується даними табл. 5.5 для трьох категорій систем водопостачання.

Таблиця 5.5

Числові значення coefficientів готовності та імовірності безвідмовної роботи систем водопостачання за даними СНИП 2.04.02-84 [25]

Категорія	Зниження подачі 30%			Зниження подачі на 30...100%			Примітка
	$T_0$ , год.	$K_2$	$P(T_0)$	$T_0$ , год.	$K_2$	$P(T_0)$	
I	72	0,909	0,905	0,16	0,99977	0,99977	Перерва в подачі води – 10 хв.
II	240	0,750	0,717	6	0,99174	0,99170	
III	360	0,667	0,607	24	0,96774	0,96722	

Кoefficient готовності  $K_2$  розраховано за формулою

$$K_2 = \frac{T_0}{T_0 + T_0} \quad (5.22)$$

Імовірність безвідмовної роботи  $P(T_0)$  визначено за формулою

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (5.23)$$





При  $\lambda = const$   $\lambda = \frac{1}{T_0}$  і  $t = T_0$ .

При проведенні розрахунків нормовані величини часу зниження подачі води прийняті такими, що відповідають часу відновлення  $T_0$ , і в той же час, термін напрацювання на відмову –  $T_0 = 1$  місяцю (720 годин). Це є більш правильним рішенням, ніж приймалось раніше (один рік). Експлуатаційні організації СПРВ у містах («Водоканали») ведуть технічну звітність щомісячно, а проведені спостереження за потоками аварійності вказують, що зниження і припинення подачі води в діючих СПРВ у нинішніх умовах відбуваються частіше ніж один раз за рік.

Як засвідчують наведені дані (табл. 5.5), у межах часу відновлення  $T_0$  коефіцієнт готовності  $K_2$  та ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  практично рівні. Але, для СПРВ, які належать до відновлювальних технічних систем безперервної дії, рівень їхньої надійності визначають за коефіцієнтами готовності  $K_2$ . Така ситуація має місце для більшості діючих СПРВ населених пунктів України. Як правило, природні фактори, що впливають на формування розподілу витрат води, не залежать від технічних, і навпаки, технічні — від природних. Тому, їх можна розглядати як незалежні потоки випадкових величин. Це означає, що ймовірність водорозбору  $P(t)$  не може перевищувати технічну надійність системи. Тобто, в світлі вище розглянутих показників справедливо співвідношення  $P(t) \leq K_2$ . Виходячи з аналогій у визначенні ймовірності водорозбору  $P(t)$  і коефіцієнтів готовності  $K_2$ , вони можуть бути розраховані як відношення часу нормальної (безвідмовної) роботи до тривалості розрахункового періоду.

Враховуючи, що періоди напрацювання на відмову  $T_0$  і відновлення  $T_0$  наступають один за одним, можна записати

$$T_{0,cp.} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{i=1}^{n_0} T_{0,i}, \quad (5.24)$$

$$T_{0,cp.} = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{i=1}^{n_0} T_{0,i}, \quad (5.25)$$



$$\sum_{i=1}^{n_g} T_{0,i} + \sum_{i=1}^{n_g} T_{\epsilon,i} = T_p, \quad (5.26)$$

де  $n_g$  — кількість відмов протягом розрахункового періоду  $T_p$ .

Тоді, ґрунтуючись на попередніх висновках середній за період  $T_p$  — коефіцієнт готовності  $K_{z.cp}$ .

$$K_{z.cp} = \frac{T_{0.cp}}{T_{0.cp} + T_{\epsilon.cp}} = \frac{\frac{1}{n_g} \cdot \sum_{i=1}^{n_g} T_{0,i}}{\frac{1}{n_g} \cdot \sum_{i=1}^{n_g} T_{0,i} + \frac{1}{n_g} \cdot \sum_{i=1}^{n_g} T_{\epsilon,i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_g} T_{0,i}}{T_p} = \frac{T_{\bar{0}.p.}}{T_p}, \quad (5.27)$$

де  $T_{\bar{0}.p.}$  — сумарна тривалість безвідмовної роботи системи протягом розрахункового періоду  $T_p$ .

На відміну від коефіцієнта готовності  $K_z$  параметр  $K_{z.cp}$  може фігурувати лише як коефіцієнт безвідмовної роботи СПРВ  $K_{\bar{0}.p.}$ .

Його величина досить просто визначається за статистичними даними диспетчерських служб «Водоканалів». Для діючих СПРВ вони становлять:

- при повній перерві в подачі води – 0,90...0,98;
- при знижені подачі води (до 30 %) – 0,50...0,85.

Якщо ймовірність водорозбору  $P(t)$  розглядати як відношення часу  $T_{q,i}$  протягом якого витрати не перевищують заданого значення  $q_i$  до тривалості всього розрахункового періоду  $T_p$ , то можна записати

$$P_i = \frac{T_{q,i}}{T_p} = \frac{\sum_{j=1}^i T_{q,i}}{T_p}, \quad (5.28)$$

де  $T_{q,i}$  — тривалість періоду, протягом якого мають місце витрати для  $j$ -го діапазону спостережень ( $q_{j-1} < q \leq q_j$ ).

Ураховуючи, що формули (5.27) і (5.28) є суттєво подібними, а ймовірність водорозбору не може перевищувати технічну надійність системи, для їх розрахункових величин буде справедливим

$$P_p = K_{z.p.} = 1 - P_{o.p.}, \quad (5.29)$$



$P_{p.p.}$ ,  $K_{z.p.}$ ,  $P_{o.p.}$  — розрахункові величини ймовірності водорозбору, коефіцієнта готовності та рівня забезпеченості.

На підставі отриманих даних (табл. 5.5) можна рекомендувати як нормативні величини допустимого часу зниження подачі води  $T_{zn.}$  та коефіцієнтів готовності  $K_{z.cp.}$  для трьох категорій СПРВ (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Рекомендовані нормативні величини часу зниження подачі води  $T_{zn.}$  та коефіцієнтів готовності  $K_{z.p.}$

Категорія	Зниження подачі води				Дані СНиП 2.04.02-84	
	До 30%		На 30...100%		$T_{zn.(30)}$ , діб	$T_{zn.(30...100)}$ , діб.
	$T_{zn.(30)}$ , діб	$K_{z.p.}$	$T_{zn.(30...100)}$ , діб.	$K_{z.p.}$		
I	3	0,9	6	0,99	3	10 хв.
II	10	0,75	12	0,98	10	6 год
III	15	0,6	24	0,97	15	24 год.

#### Контрольні запитання.

1. Які методи визначення розрахункових витрат застосовуються в практиці проектування і розрахунку систем ВІВ?

3. Як враховують нерівномірність споживання води при детермінативному визначенні розрахункової витрати?

4. Які особливості ймовірнісних методів визначення витрат води?

5. В чому полягає надлишковість забезпечення розрахункової продуктивності системи над фактичним водоспоживанням?

6. Які теоретичні закони розподілу застосовують при прогнозуванні нерівномірності водоспоживання та водоподачі системою водопостачання?

7. Як визначити ймовірність появи розрахункової витрати у певний момент часу?

8. Як визначають коефіцієнти забезпеченості витрати та напору?

9. Як визначають коефіцієнти готовності та безвідмовної роботи для різних категорій водозабезпечення споживачів?

10. Як визначити середнє напрацювання системи на відмову та середній період відновлення системи?



## **6. ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВОДОПРОВІДНИХ І ВОДОВІДВІДНИХ МЕРЕЖ**

### **6.1. Збір і аналіз статистичних даних про потік аварій**

Своєчасна реєстрація всіх відмов, що з'являються в процесі експлуатації мереж, збір необхідних відомостей про виявлені відмови на поточний момент часу являють собою єдине й найбільш ефективне джерело інформації для одержання чисельно обґрунтованих показників надійності трубопроводних систем.

Методика дослідження критеріїв надійності трубопроводних систем складається з таких етапів:

1. Обстеження діючої водопровідної мережі на предмет установлення її структурних і конструктивних особливостей, фактичних режимів, і термінів експлуатації окремих трубопроводів.

2. Збір і нагромадження статистичних даних про відмови окремих ділянок трубопроводів у хронологічному порядку їхньої появи.

3. Обробка, аналіз статистичних даних з узагальненням і систематизацією відмов за такими впливовими факторами: об'єктом дії, характером виявлення й факторами впливу на мінливість критеріїв надійності, зокрема, на параметр інтенсивності відмов, за ступенем складності відновлення працездатного стану складових елементів, та за масштабом і видом шкоди, яку завдають відмови;

4. Вибір складу основних критеріїв надійності трубопроводної системи та оцінка поточних характеристик надійності для окремих ділянок трубопроводів.

5. Складання прогнозної моделі змінюваності критеріїв надійності для окремих ділянок водопровідної мережі з урахуванням термінів їхньої експлуатації та категорії відмови.

6. Перевірка адекватності отриманої прогнозної моделі на діючих водопровідних мережах.

7. Аналіз і узагальнення результатів досліджень.

На першому етапі потрібно провести анкетування експлуатаційних підприємств, які проводять експлуатацію діючих систем у різних за обсягом населених пунктів. В подальшому така анкета дозволяє одержати уніфіковані дані про будь-яку систему подачі й розподілу води й розроблена на основі досвіду обстеження



споруд діючих водопровідних систем міст України Анкети заповнювались із залученням відповідальних представників виробничих підрозділів експлуатаційних підприємств, зокрема працівників диспетчерської служби, з обов'язковим затвердженням остаточно зведених відомостей головним інженером експлуатаційного підприємства.

Усього проанкетовано шість експлуатаційних підприємств (м. Рівне, Львів, Нововолинськ, Ужгород, Івано-Франківськ, Красноперекіпськ) протягом 1995 по 2000 рік. Періодично подібне анкетування запроваджується й у інших населених пунктах України).

На другому етапі для уніфікації всього процесу збору відомостей про аварії водопровідних ліній і отримання найбільш повної інформації було розроблено єдину форму реєстрації відмов.

Для цього потрібно заповнити «Журнал аварійності водопровідної мережі й водоводів», «Разову реєстраційну картку», «Картку ремонтної ділянки».

В «Журналі аварійності водопровідної мережі й водоводів» реєструється вся основна інформація про відмови, що виникали в процесі експлуатації всіх трубопроводів, у хронологічному їх порядку. Тут наводиться інформація про адреси елементів, які відмовили й місця відключення «ремонтних» ділянок мережі (водоводу), терміни припинення подачі води по них, а також дати подачі заявок про відмови й час закінчення ремонтних робіт, час відновлення подачі води по ділянці. «Журнал» заповнюється черговим диспетчером експлуатаційного підприємства відразу після одержання заявки про відмови.

Після виконання аварійно-відновлювальних робіт (АВР) для усунення відмови, відповідальна особа аварійної бригади заповнює „Разову реєстраційну картку”, яка містить наступні відомості, переважно поточного характеру: дату й точний час виникнення відмови (надходження заявки); місце відмови на трубопроводі (номер ділянки, №№ водопровідних колодязів, що обмежують «ремонтну ділянку») та їхню точну адресу; час завершення ремонту й промивки та дезінфекції труб; дані про матеріал, діаметр труб, довжину ділянки трубопроводу; дані про характер відмови (тріщина, розрив, «свищ», перелом стінок труб, пошкодження стикового з'єднання, їх число, ушкодження фасонних частин,



арматури, що входять до складу ремонтної ділянки); ескіз відмовленої ділянки; причини відмови (очевидні або передбачувані). Для зручності проведення аналізу поточних відмов, характеру та якості проведення АВР, заповнення реєстраційної картки, усі можливі відмови на ремонтній ділянці мають порядкові номери. Відомості, що їх уміщує реєстраційна картка, передаються аварійною бригадою вповноваженій особі відділку (служби) експлуатації водопровідної мережі з наступним занесенням інформації в журнал реєстрації або в іншу технічну документацію («Паспорта ділянок мережі», «Картку ремонтної ділянки чи на магнітні носії комп'ютера»).

«Картка ремонтної ділянки» повинна містити основні відомості про конструктивні особливості ремонтних ділянок водопровідних ліній мережі (для кожної трубопровідної лінії окремо), а також відомості про характер тих ушкоджень, що виникали на ділянці трубопроводу в період спостереження за її надійністю в хронологічному порядку (зазвичай цей період складає календарний рік). У карточці наводять ескіз ділянки трубопроводу, на якому виконується монтажна схема розглядаємої ділянки із вказівкою трубопровідної арматури й фасонних частин у кожному водопровідному колодязі. Усі конструктивні елементи нумерують, а їхні характеристики (діаметр умовного проходу, матеріал труб і фасонних частин, тип стикового з'єднання, спосіб антикорозійного захисту) наводять у спеціальній таблиці. Всім основним типам відмов конструктивних елементів привласнюють порядкові номери.

У спеціальну таблицю картки вносять дані про заявлені відмови в хронологічному порядку їхньої появи. Ця картка повинна заповнюватися диспетчерською службою разом із виробничо-технічним відділом експлуатуючої організації (підприємства).

Поточна інформація повинна вноситись не рідше одного разу на місяць. Наприкінці календарного року варто аналізувати зміни, характеризуючи конструктивну будівлю ділянки (якщо такі зміни відбувалися).

З метою накопичення, аналізу й довготривалого зберігання відомості про окремі ділянки водопровідної мережі й водоводи, а також про характер відмов заносяться в інформативну базу комп'ютера. Термін зберігання статистичних зведень не менше 10 років. На другому етапі слід також проаналізувати інформацію,



занесену у вище зазначену технічну документацію. Такий аналіз служить надалі (при досить тривалому періоді спостережень) основним базисом для визначення чисельних показників надійності водопровідних ліній мережі й водоводів.

Водопровідна мережа й водоводи (трубопровідна система) посідає провідне місце у вартості, праце- та енергоємності обслуговування водоспоживачів. Як показують результати обстеження діючих систем водопостачання, що були проведені багатьма спеціалістами в галузі водопостачання, загальна довжина водопровідної мережі населеного пункту ( $L_m$ ) знаходиться у прямо пропорційній залежності від чисельності населення, яке мешкає в ньому ( $N_{ж}$ ) (рис. 6.1). У цілому в Україні з року в рік спостерігається тенденція зростання довжини водопровідних мереж. Так, за останні 20 років довжина водопровідних мереж України зросла майже на 40 %, а за останні 10 років – на 15%. При цьому, параметр  $\delta_m$  (питома довжина водопровідної мережі, яка припадає на одного жителя населеного пункту) для населених пунктів з величиною добового водоспоживання до 30 тис.м<sup>3</sup> в 3 .. 3,5 рази більший, ніж для населених пунктів з величиною добового водоспоживання понад 100...150 тис.м<sup>3</sup>, де він складає  $\delta_m=2$  м.

Проте, зі зміною значення параметра  $\delta_m$  спостерігається збільшення питомого показника об'єму мережі, що призводить до зростання тривалості перебування води в ній.

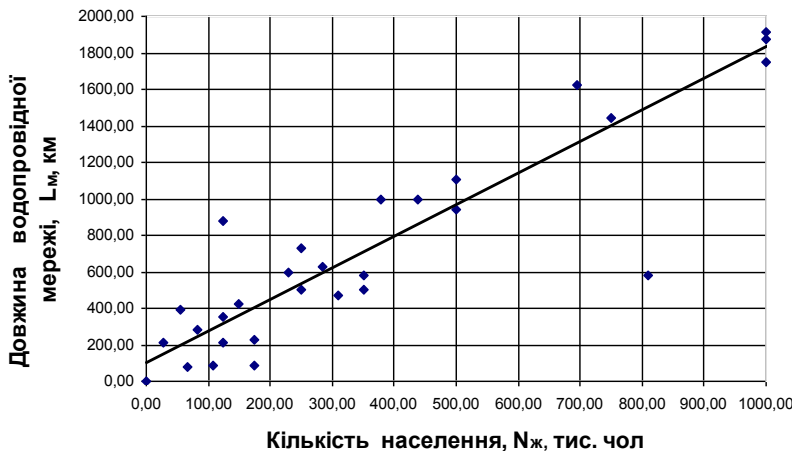


Рис. 6.1. Залежність довжини водопровідної мережі міст від кількості населення, що в них мешкає

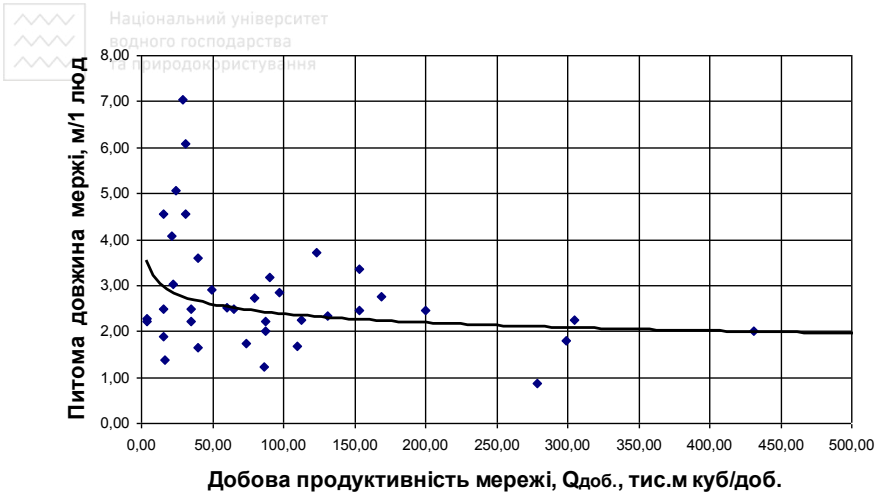


Рис. 6.2. Залежність питомої довжини водопровідної мережі, яка припадає на 1 людину від продуктивності мережі  $\delta_n=f(Q_p)$

Зі зростанням довжини трубопроводних ліній діючих водопровідних мереж і водоводів одночасно збільшується їхня частка, що перебуває в аварійному стані (постійно чи періодично), або тих, які повністю спрацювали свій технічний ресурс (рис. 6.3).

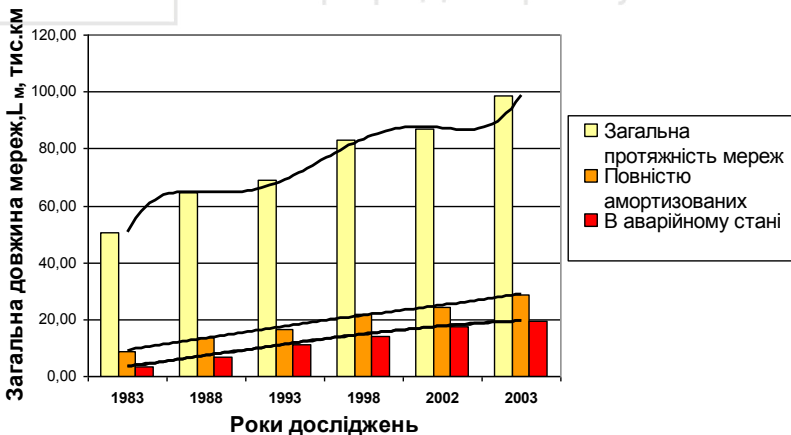


Рис. 6.3. Стан зовнішніх водопровідних мереж в Україні

Унаслідок незадовільного технічного стану мереж та насосного обладнання, а також недбалого використання води, що призводить до стану, у якому із причини неоптимального режиму експлуатації





системи водопостачання в цілому втрачається близько 25 відсотків спожитої за рік електроенергії. Питомі витрати енергоресурсів на 1 м<sup>3</sup> поданої води становлять у середньому 1 кВт/год., а в окремих областях України цей показник має ще більші значення (Харківська область – 1,32 кВт/год., Луганська область – 1,38 кВт/год., Рівне – 2 кВт/год.).

Аналіз результатів натурних досліджень діючих СПРВ населених пунктів України показав, що такі значення питомих енергозатрат у багатьох випадках зумовлені не тільки втратами води з водопровідної мережі, але й помилками експлуатаційного персоналу, відсутністю ефективних технічних заходів експлуатації систем, недосконалою системою управління, дефіцитом витратних матеріалів, низьким рівнем кваліфікації експлуатаційного персоналу і автоматизації системи водопостачання.

Таким чином, в основу класифікації виникнення відмов належить покласти принципи системності, широкого охоплення причин і факторів, ієрархічності та хронологічності сфер їхнього впливу як на процес забезпечення безвідмовної роботи, так і на терміни шкідливого впливу відмов на окремі елементи й споруди СПРВ і системи водопостачання в цілому, а також розміри народногосподарських, соціальних, і екологічних збитків, що наносяться цими відмовами. Усі фактори й причини відмов окремих трубопроводів і їхніх систем належить розділити на (Рис. 6.4) конструктивні; фактори об'єктивного характеру; фактори суб'єктивного характеру.



Рис. 6.4. Систематизація факторів впливу на надійність і економічну ефективність трубопровідних систем водопостачання та основні причини виникнення відмов.



До конструктивних (рис. 6.5) належить відносити наступні групи факторів

1) такі, що обумовлені суто конструктивними характеристиками окремих трубопровідних ліній (матеріал, діаметр труб, тип стикового з'єднання, кількість і тип водопровідної арматури, фасонних частин, і деталей, вид антикорозійного покриття, і місця його нанесення, глибина вкладання труб, вид основи під труби та ін.).

2) такі, що обумовлюються структурними особливостями трубопроводу або мережі. Вони включають топологію водопровідної мережі, її тип (ступінь кільцювання, просторовість, наявність дублюючих та супроводжуючих ліній, переключень, байпасів, розподіл на ремонтні ділянки і т.п.).

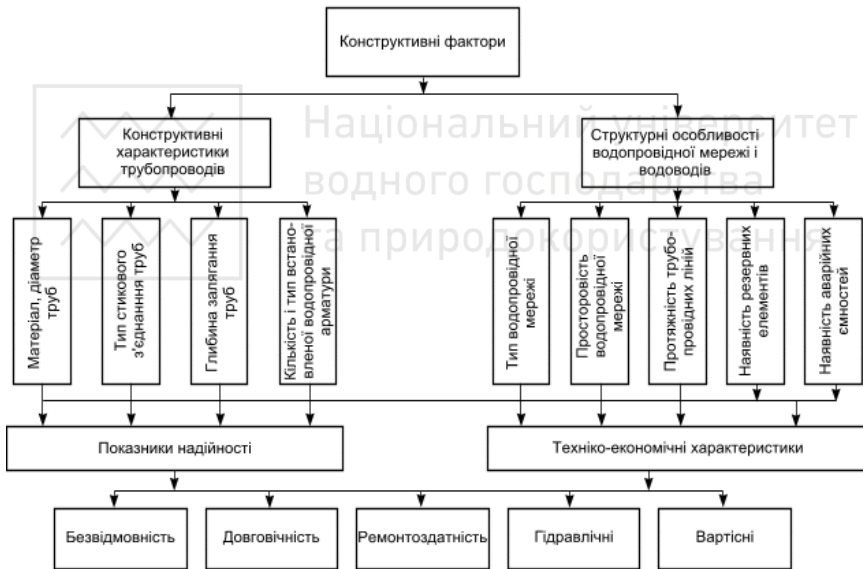


Рис. 6.5 Класифікація основних конструктивних факторів надійності водопровідних мереж та водоводів

До цієї ж групи факторів потрібно також відносити протяжність як структурну характеристику окремих трубопроводів (ділянок), довжину кілець по периметру, площу охоплення кільця, наявність ємностей для збереження аварійних і регулюючих запасів води, підкачувальних насосних установок, свердловин і т.і.



До класу факторів об'єктивного характеру потрібно відносити ті з них, котрі безпосередньо не пов'язані з життєдіяльністю людини, які представлені у вигляді рис. 6.6.

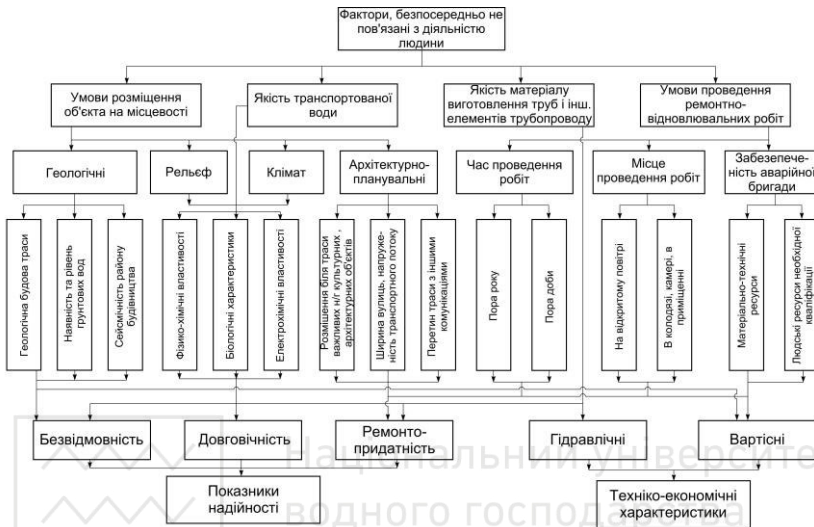


Рис. 6.6. Класифікація факторів, напряду не пов'язаних із діяльністю людини, що впливають на надійність водопровідних мереж і водоводів.

Фактори, віднесені до третього класу, обумовлені безпосередньо участю людини в процесі створення та експлуатації трубопроводних систем (Рис. 6.7). Їх можна умовно поділити на фактори, вплив котрих на надійність трубопроводної системи проявляється вже на стадії проектування, вплив котрих на надійність виявляється в процесі будівельно-монтажних робіт при спорудженні трубопроводів, що характеризують режими експлуатації трубопроводної системи.

При виборі номенклатури показників надійності пропонується враховувати перш за все фактори з найвищим рейтингом впливу на характеристики надійності та економічності як окремого трубопроводу, так і всієї трубопроводної системи.

В основу поділу відмов водопровідних мереж і водоводів покладено принцип обліку характер увідмови, складності відновлення відмовленого елемента, величини народногосподарської, соціальної шкоди, що вони завдають.

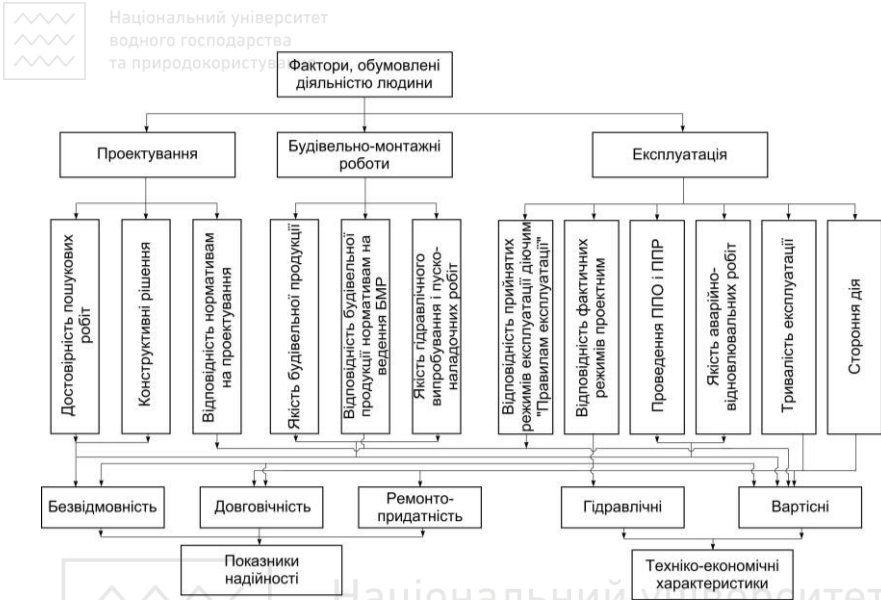


Рис. 6.7. Класифікація факторів, обумовлених участю людей в процесі створення і експлуатації водопровідних мереж і водоводів, що впливають на їхню надійність

При виборі номенклатури показників надійності пропонується враховувати перш за все фактори з найвищим рейтингом впливу на характеристики надійності та економічності як окремого трубопроводу, так і всієї трубопровідної системи.

В основу поділу відмов водопровідних мереж і водоводів покладено принцип обліку характеру відмови, складності відновлення відмовленого елемента, величини народногосподарської, соціальної шкоди, що вони завдають. Безперечно, що основними об'єктами дії відмов являються системи трубопровідних ділянок (водоводи, лінії водопровідної мережі, уводи до будинків та промислових будівель) та їхні підсистеми (ремонтні ділянки, ланки труб, стикові з'єднання, трубопровідна арматура, та фасонні частини) (Рис. 6.8).

Усі відмови трубопровідних систем можна розділити на декілька груп за наступними ознаками: за об'єктом дії; за причинами виникнення та факторами впливу; за характером виявлення та строками дії на об'єкт; за характером та обсягами наслідків. Тому відмови за цією ознакою можна характеризувати як



«розладнання», «часткова відмова» та «повна відмова». Більш поглибленою є систематизація відмов за характером і розмірами наслідків, що спричиняють відмови (Рис. 6.8).

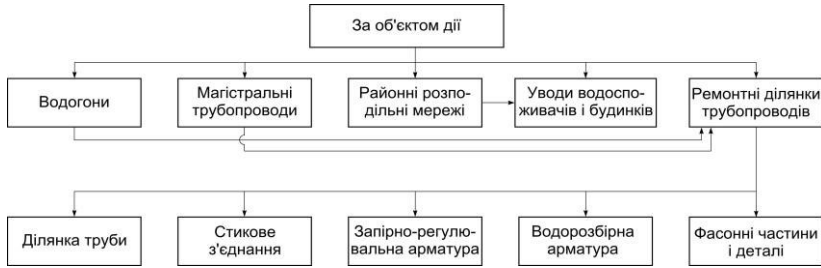


Рис. 6.8. Систематизація об'єктів дії відмов

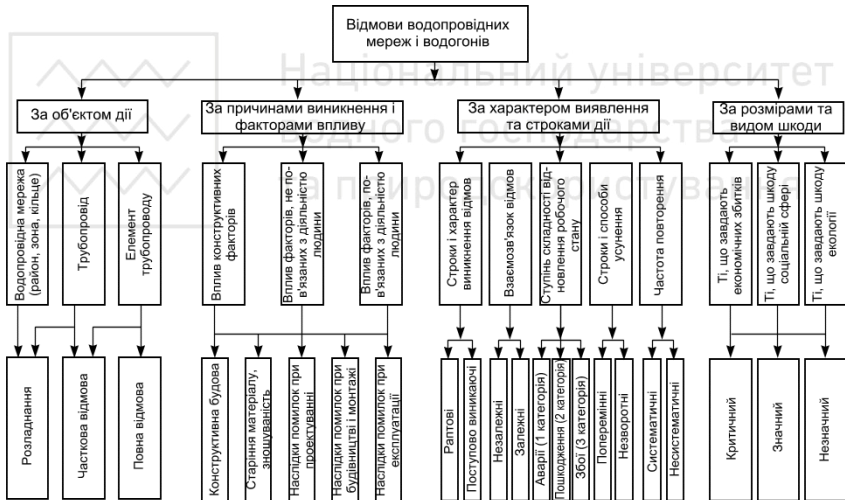


Рис. 6.9. Загальна класифікація відмов водопровідних мереж і водоводів

Важливою є класифікація відмов за *масштабами наслідків*. Її слід визначити за двома головними ознаками: за характером шкоди (економічна, соціальна, екологічна) та за розміром збитків (критичні, значні, незначні). За цими ознаками всі відмови поділяються на: «катастрофи», «аварії», «пошкодження», «збої». (Рис.6.9). Більш влучною слід уважати систематизацію



відмов, яка дозволяє поділити їх на три категорії, за ступенем складності їхнього відновлення (Рис. 6.10).

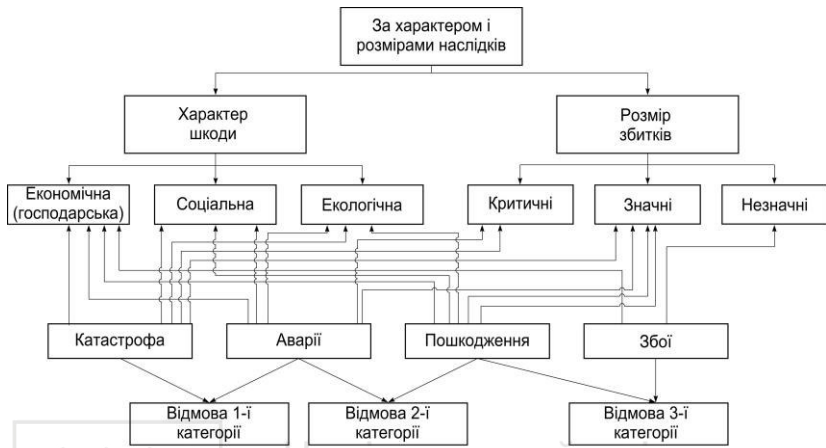


Рис. 6.10. Систематизація відмов за характером та розмірами наслідків

До *першої* варто відносити відмови, що впливають на працездатність як однієї водопровідної лінії, так і усієї мережі та істотно ускладнюють (унеможливають) забезпечення споживачів водою в необхідній кількості та під необхідним напором. Інакше цільова функція надійності водопостачання [12,13] не виконується в повному її обсязі.

При відновленні таких відмов вимагаються значні витрати часу та матеріальні витрати. У той же час без води залишаються всі споживачі, що підключені до відмовленої ділянки, а також споживачі великих локальних районів у населеному пункті.

Зазначені види ушкоджень варто пов'язувати з *аваріями*, а відновлення відмовлених елементів ведеться в пріоритетному порядку.

*Аваріями* пропонується вважати наступні види відмов на водопровідних мережах і водоводах:

1) течія магістральної водопровідної лінії в результаті утворення тріщин і «свищів» на трубах із діаметром умовного проходу  $d_y \geq 300$  мм. До аварій такого ж виду варто відносити пошкодження труб і меншого умовного проходу в тих випадках, коли відновлення



працездатності ремонтної ділянки пов'язано із заміною ділянки труби, водопровідної арматури чи фасонної частини;

2) відмова стикових з'єднань труб з діаметром  $d_y \geq 300$  мм;

3) відмова, пов'язана з повною втратою працездатності пожежного гідранта, при якому необхідна його заміна.

4) відмова запірно-регулюючої арматури, яка встановлена на ділянках трубопроводу будь-якого діаметра, у випадках, коли відновлення відмови виконується шляхом капітального ремонту виробу з його демонтажем.

Слід зауважити, що до «аварій» відносяться тільки ті відмови, що виникають на магістральних водопровідних лініях будь-якого діаметра труб. Усі оперативні дії по відновленню працездатності водопровідної лінії, яка знаходиться в стані «аварій», виконуються при відключенні «ремонтної» ділянки (всієї лінії) з роботи, із припиненням подачі води по ній.

До *другої* категорії віднесені відмови, що призводять до значного зниження подачі води споживачам, а виконання ремонтно-відновлювальних робіт (РВР) відбувається при короткочасному відключенні водопровідної ремонтної ділянки (цілої лінії) із роботи (можливі варіанти й без відключення). При виникненні відмови другої категорії більшість споживачів одержують не більше 70% від необхідної їм кількості води або в кількості, що не перевищує обсяг, передбачений аварійним режимом для даного споживача [12].

Такі відмови пропонуються називати *частковими відмовами (пошкодженнями)* окремих елементів водопровідних ліній. Вони не завжди призводять до повної відмови всієї трубопроводної системи.

Таким чином, до відмов другої категорії слід віднести наступні:

1) ушкодження магістральної водопровідної лінії з діаметром  $d_y = 100...300$  мм, усунення якої не передбачає заміни ділянки труби;

2) ушкодження стикового з'єднання труб магістральної лінії з діаметром труб ( $d_y=100...300$  мм);

3) ушкодження засувки, усунення якого передбачено проводити без демонтажу і заміни виробу ( $d_y=300$  мм);

4) ушкодження пожежного гідранта, усунення якого передбачено без його демонтажу і заміни.

Відмови *третьої* категорії відновлюються без довгострокового відключення ділянок водопровідної лінії або водоводу з роботи.



Тому споживачі, як правило, не потерпають від значного дефіциту в подачі води. Такі відмови варто відносити до розряду "збоїв". Однак у результаті виникнення збоїв у роботі окремих водопровідних ліній можливі значні витоки води, тому що відновлення відмов третьої категорії виконується в останню чергу.

До третьої категорії варто віднести наступні види відмов:

1) ушкодження тупикових магістральних і розподільних ліній з невеликим діаметром труб ( $d_y \leq 100$  мм), а також ушкодження уведень в окремі будинки й до невеликих промислових і комунальних споживачів;

2) всі інші відмови, що не були віднесені до складу першої, або до другої категорій.

## 6.2. Прогнозування мінливості критеріїв надійності в часі

Оцінка показників надійності виконується методами математичної статистики на основі отриманих статистичних даних про відмови окремих ділянок водопровідних ліній діючих водопровідних мереж і водоводів.

Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  є одною з основних характеристик безвідмовності водопровідних і водовідвідних мереж тому, що вона описує змінюваність потоку відмов у часі (в процесі експлуатації).

Тому, в основу методики визначення інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  реконструйованих (діючих) мереж слід покласти принцип урахування «ремонтної ділянки» в якості одиничного елемента трубопровідної лінії, а також принцип розділення всіх аварій, які виникали на ділянці трубопроводу, за категоріями складності відновлення робочого стану з урахуванням мінливості числового значення інтенсивності відмов протягом усього терміну експлуатації ділянки трубопроводу. Важливо встановити характер зміни закону розподілення  $\lambda(t)$  у залежності від тривалості експлуатації ділянки трубопроводу. Це дозволяє в подальшому більш правильно, і з достатньою точністю визначати й прогнозувати інші показники безвідмовності (наприклад, імовірність безвідмовної роботи трубопровідної лінії  $P(t)$ ), які залежать напряду від інтенсивності відмов.





Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  водопровідного обладнання є

умовною ймовірністю його відмови у інтервалі часу  $(t, t+\Delta)$  при умові, щодо моменту  $t$  обладнання, визначається за формулою (1.11). На практиці, з метою визначення величини інтенсивності відмов обладнання за результатами статистичних даних про відмови, використовують аналітичну залежність (1.9). Однак, такий підхід до визначення числових значень інтенсивності відмов може бути застосований тільки в процесі оцінки надійності окремих невідновлювальних елементів водопроводу, і його аж ніяк не можна вважати прийнятним для дослідження потоку пошкоджень ліній мережі, які є відновлювальними системами. Це, у деякій мірі, пов'язано з тим, що в сучасній теорії надійності водопровідних систем не розроблено чіткого критерію про те, які з елементів ділянки трубопроводу (трубопровідної системи в цілому) можна вважати «невідновлювальними». Конструктивні ж фактори справляють досить суттєвий вплив на безвідмовність водопровідних ліній мережі. Тому, у процесі вивчення впливу деяких конструктивних факторів на характер мінливості показників безвідмовності можна зробити обґрунтовані висновки про характер зміни функції розподілу інтенсивності відмов  $\lambda(t)$ . Дослідження на діючих трубопровідних системах водопостачання показують, що цей параметр безвідмовності залежить не тільки від матеріалу й діаметра труб, а також і від терміну експлуатації трубопроводу ( $t_e$ ), який розглядаємо. Результати обробки статистичної інформації спостереження за виходом із ладу водопровідних ліній мережі міста Рівне, а також міст Івано-Франківськ, Нововолинськ (Волинської області), Львів підтверджують, що залежність параметра інтенсивності має різну функцію розподілу  $f(t_e)$ , що враховує рік експлуатації ( $t_e$ ) ділянки водопровідної лінії, і який співпадає з роком спостереження  $t$ . Тобто термін експлуатації трубопроводу умовно слід поділяти на такі етапи: пуско-наладки ( $t_{n.n.}$ ), нормальної експлуатації ( $t_{n.e.}$ ), інтенсивного старіння ( $t_{i.c.}$ ). Це цілком узгоджується із рекомендованими термінами для будь-яких технічних систем (див.розд.1.п.1.4). Для цього було побудовано модельну залежність для визначення параметра інтенсивності відмов  $\lambda(t_e)$  від конструктивних, експлуатаційних факторів, ступеню складності відновлення відмовлених ділянок. У загальному



видного господарства  
та природокористування

вигляді закон розподілення інтенсивності відмов можна записати так:

$$\lambda = f(t_e), \quad (6.1)$$

де  $t_e$  – термін експлуатації, років, для трубопроводу з відповідним діаметром і матеріалом труб, що припадає на момент спостереження.

Період пуско-наладки ділянки трубопроводу ( $t_{nn}$ ). Хронологічно його початок співпадає з пуском трубопровідної ділянки в постійну експлуатацію. Досвід дослідження діючих систем водопостачання показує, що для металевих труб він триває 3...5 років. Протягом періоду пуско-наладки в процесі експлуатації ділянки трубопроводу поява відмов, а також тривалість самого періоду обумовлені наступними факторами впливу:

1) конструктивними характеристиками трубопроводу, включаючи матеріал виготовлення труб, арматури, фасонних частин та типом і конструктивними особливостями стикового з'єднання;

2) факторами, що пов'язані з участю людини в проведенні пусконаладжувальних робіт, включаючи якість гідравлічного випробування (див.п.6.1)

Аналіз накопиченого статистичного матеріалу про потік відмов діючих водопровідних мереж і водоводів (рис.6.11) доводить, що функція розподілу інтенсивності відмов від терміну експлуатації ( $\lambda(t_e)$ ) у межах періоду пуско-наладки може бути апроксимована експоненціальним законом (з коефіцієнтом кореляції  $r^2=0,999$ ):

$$\lambda_{nn}^i(t_e) = \lambda_0^i \cdot e^{-b_1^i \cdot t_e}, \quad (6.2)$$

де  $\lambda_{nn}^i(t_e)$  – інтенсивність відмов ділянок трубопроводів та їхніх елементів із  $i$ -тою категорією складності відновлення, що зафіксовані на водопровідних лініях мережі (водоводів), укладених із труб відповідного матеріалу і діаметру, які на момент досліджень мають термін експлуатації, що чисельно не перевищує тривалість періоду пуско-наладки, 1 км/рік;

$\lambda_0^i$  – коефіцієнт, що характеризує якість будівельно-монтажних робіт та гідравлічного випробування трубопровідної ділянки, 1 км/рік. Фізичний зміст коефіцієнта  $\lambda_0^i$  наступний – питома кількість відмов  $i$ -тої категорії складності, які мали місце на даній ділянці

трубопроводу встановленої довжини, з відповідним діаметром труб протягом безкінечно малого терміну її експлуатації ( $t_e \rightarrow 0$ ).

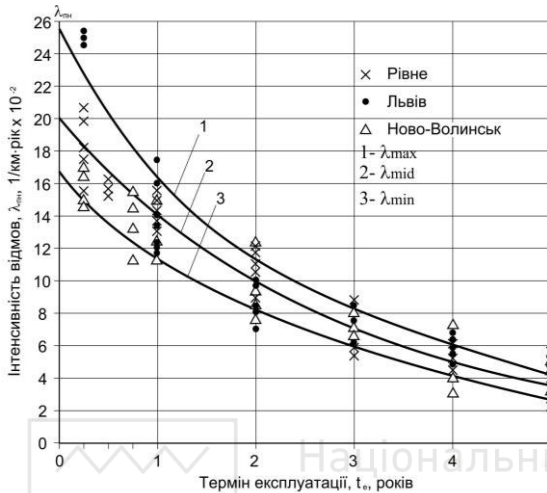


Рис. 6.11. Графік функції розподілу виду  $\lambda = f(t_e)$  для періоду пуско-наладки чавунного трубопроводу з  $d_y = 400$  мм для потоку відмов першої категорії складності відновлення.

$b_1^i$  – коефіцієнт, який характеризує якість пусконаладжувальних робіт і поточних ремонтів трубопроводу відповідної довжини, певного матеріалу труб та визначеного діаметра.

Від його величини залежить ступінь крутизни графіка функції виду (6.2). Для чавунних труб він може змінюватись в межах такого числового інтервалу:  $b_1 \in [0; 0,5]$  (залежно від діаметра труб та категорії складності відновлення відмови).

Тривалість періоду нормальної експлуатації ( $t_{ne}$ ) залежить від матеріалу й діаметра труб, а також рівня експлуатації трубопровідної системи та для металевих трубопроводів триває 15...20 років. Його початок співпадає з термінами завершення попереднього періоду (пуско-наладки). Функція розподілення параметра інтенсивності відмов із коефіцієнтом кореляції  $r^2=0,998$  (рис. 6.12) може бути апроксимована залежністю виду :

$$\lambda_{ne}(t_e) = \frac{t_e}{b_2 + b_3 \cdot t_e}, \quad (6.3)$$

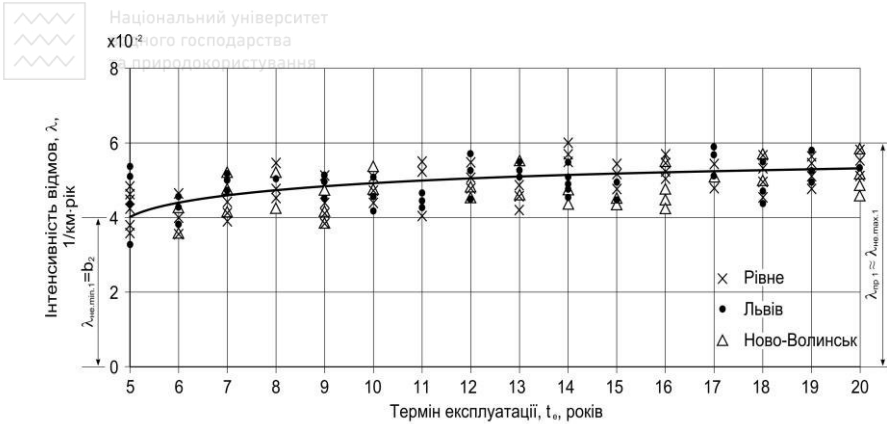


Рис. 6.12. Графік функції виду  $\lambda = f(t_e)$  для періоду нормальної експлуатації чавунного трубопроводу з  $d_y=400$  мм і у разі потоку відмов першої категорії складності відновлення.

Розділивши чисельник та знаменник на  $t_e$  перетворимо вираз (6.3) до вигляду:

$$\lambda_{не}(t_e) = \frac{1}{(b_2/t_e) + b_3}. \quad (6.4)$$

Цілком логічно, що у випадку  $t_e \rightarrow \infty$  гіпербола (6.4) наближається до асимптоти (рис. 6.12), яка в аналітичному вигляді має таку залежність:

$$\lambda_{не}(t_e) = \lambda_{не.пр.}, \quad (6.5)$$

де  $\lambda_{не.пр.} = 1/b_3$ .

У практиці проектування нових або реконструкції діючих водопровідних ліній і водоводів величина  $\lambda_{не.пр.}$  може бути задана, і для певних умов їхньої експлуатації, може апріорно визначати деякий оптимальний рівень параметра інтенсивності відмов для трубопроводних ліній, що прокладені з однакового матеріалу, діаметра труб та з однаковим типом стикового з'єднання, урахуваючи категорію можливих відмов за складністю відновлення.

На діючих водопровідних лініях рівень параметра інтенсивності відмов із відповідною категорією складності відновлення працездатного стану для трубопроводів із певного матеріалу й діаметра, може бути визначений при аналізі статистичних даних про відмови окремих ділянок трубопроводів (наприклад, для

західного регіону України він, відповідно до даних досліджень автора, складає  $\lambda_{np}=(5...8) \cdot 10^{-2}$  1/км·рік). Однак, реалізації алгоритму з визначення параметра інтенсивності відмов перешкоджає складність визначення невідомих коефіцієнтів  $b_2$  і  $b_3$ , які необхідні для побудови гіперболічної залежності виду (6.4). Для вирішення цієї задачі слід установити фізичний зміст коефіцієнтів  $b_2$  і  $b_3$ , та визначити їхні числові значення.

Із цією метою слід лінеаризувати рівняння виду (6.3) і перетворити його у вигляді:

$$t_e = -\frac{b_2}{b_3} + \frac{1}{b_3} \cdot \left( \frac{t_e}{\lambda_{nn}} \right). \quad (6.6)$$

Уведемо лінеаризуючі заміни для перемінних величин, та отримаємо наступні рівняння:

$$t_e' = t_e; \lambda' = t_e / \lambda_{ne}; b_2' = -(b_2/b_3); \lambda_{np}' = 1/b_3, \quad (6.7)$$

У кінці перетворень отримаємо рівняння лінійного виду:

$$t_e' = b_2' + \lambda_{np}' \cdot \lambda'. \quad (6.8)$$

Базуючись на статистичних даних про відмови окремих ділянок водопровідних ліній мережі, термін експлуатації яких на момент досліджень не перевищує крайньої межі періоду «нормальної експлуатації» ( $t_e$ ), визначають  $\lambda'$  для труб з різного матеріалу і діаметра. Потім, використовуючи методи математичної статистики визначають  $\lambda_{np}'$  і  $b_2'$  (розрахунковим шляхом) і, в кінцевому результаті,  $b_2$  і  $b_3$ .

Початок періоду інтенсивного старіння трубопроводу ( $t_{ic}$ ) експлуатації ділянки трубопроводу збігається з термінами завершення попереднього періоду (нормальної експлуатації). Вплив фактора «зношення» і «старіння» стає визначальним для характеристик надійності роботи об'єкта тільки після 18...20 років його експлуатації (для прикладу, чавунні труби вступають у такий етап своєї експлуатації вже після 20 років безперервної роботи).

Сам період «інтенсивного старіння» трубопроводу може тривати протягом значного терміну часу. Однак, функція розподілення параметра інтенсивності відмов  $\lambda(t_e)$  монотонно зростає до моменту досягнення аргументом (термін експлуатації



водопровідної лінії чи її ділянки  $t_e$ ) позначки  $t_{e,max} = 30...32$  роки, після чого інтенсивність відмов починає постійно зменшуватись. Це пов'язано з тим, що трубопровід переходить у деякий «гранично припустимий» стан. Інакше, подальша експлуатація трубопроводу (його ділянки) без застосування ряду заходів із реконструкції недоцільна не тільки з економічної точки зору, але й виходячи із критерію надійності роботи трубопроводу.

У цей період, як правило, виконуються капітальні ремонти, пов'язані із заміною окремих ділянок труб, арматури, фасонних частин, перемонтування стикових з'єднань, що, у кінцевому рахунку, можна вважати повною заміною трубопроводу (повним відновленням). Ці роботи призводять до того, що функція розподілення параметра потоку відмов починає графічно вести себе так, як і на початку експлуатації трубопроводу (в період пуско-наладки), тобто трубопровід (чи його ділянка) вступає в нову циклову фазу своєї експлуатації.

Графічна залежність розподілу параметра інтенсивності відмов водопровідних ліній мережі  $\lambda(t)=f(t_{i.c.})$  виду (6.9) для періоду «інтенсивного старіння» може бути апроксимована кривою нормального закону з коефіцієнтом кореляції  $r^2 = 0,992$  (рис. 6.13).

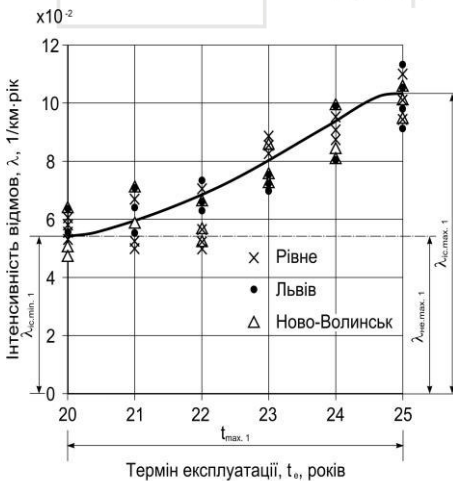


Рис. 6.13). Графік функції виду  $\lambda=f(t_e)$  для періоду інтенсивного старіння чавунного трубопроводу з  $d_y=300$  мм і у разі виникнення відмов першої категорії складності відновлення

$$\lambda_{i.c.}(t_e) = \lambda_{ne}^{\max} + \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(t_e - m_t)^2 / 2\sigma^2}, \quad (6.9)$$



де  $\lambda_{i.c.}(t_e)$  – досліджувана функція розподілення параметра інтенсивності відмов водопровідної лінії у період її інтенсивного старіння;  $\sigma^2$  і  $\sigma$  – відповідно дисперсія і середнє квадратичне відхилення інтенсивності;

Для практичних розрахунків у якості математичного очікування  $m_t$  можна прийняти термін експлуатації трубопроводу, по закінченню якого інтенсивність відмов  $\lambda_{i.c.}(t_e)$  приймає значення  $\lambda_{max.}$ , тобто  $m_t = t_{max.}$

Величини  $\sigma^2$  і  $\sigma$  у числовому вигляді слід визначати з використанням відомих методів математичної статистики (див.розд 2). При цьому,  $m_t$  – математичне очікування випадкової величини  $t_e$  у період інтенсивного старіння трубопроводної лінії. Математично параметри  $m_t$  і  $\sigma$  повністю визначають характер (форму) кривої розподілення (див.розд.3).

Таким чином, весь термін експлуатації трубопроводу (або його окремої ділянки) має циклічну форму з точки зору аналізу функції розподілення параметра потоку відмов з деяким періодом  $T = 30...35$  років.

На практиці для визначення величини  $\lambda(t_e)$  доцільно користуватися спеціально розробленими *номограмами*. Для роботи з ними достатньо визначити з необхідною точністю коефіцієнти регресії  $b_1, b_2, b_3$  для відповідного потоку відмов (1, 2, 3 категорії складності).

Імовірність безвідмовної роботи ділянки трубопроводу з довжиною  $l_{mp.}$ , км, у разі можливого виникнення відмов  $i$ -ї категорії складності відновлення, для діючого трубопроводу, який на момент оцінки надійності має термін експлуатації  $t_e$

$$P_{mp..j}^{(i)} = e^{-\lambda_{mp..j}^{(i)} \cdot l_{mp..j} \cdot t_e}, \quad (6.10)$$

де  $\lambda_{mp..j}^{(i)}$  – інтенсивність відмов  $j$ -ї ділянки трубопроводу із відомим діаметром, матеріалом труб та стиковим з'єднанням із  $i$ -ю категорією складності відновлення, 1/рік, яка відповідає певному періоду роботи трубопроводу (пуско-налашки, нормальної експлуатації чи інтенсивного старіння).

Формула (6.10) може бути застосована тільки у випадку, якщо ділянка трубопроводу була б невідновлюваним елементом у складі будь-якої трубопровідної системи (водопровідної мережі, або водоводу). Але, логічно вважати ділянку трубопроводу відновлюваною, бо вона складається з кількох груп однотипних елементів (ланки труб, трубопровідна арматура, фасонні частини й деталі, конструктивні елементи камери водопровідного колодезя тощо), що у свою чергу є відновлюваними, або замінними.

З урахуванням відновлення ділянки трубопроводу ймовірність її безвідмовної роботи може бути визначена

$$P_{mp.e.j}^{(i)} = e^{-\frac{\lambda_{mp.j}^{(i)}}{\mu_{mp.j}^{(i)}} \cdot l_{mp.j} \cdot t_e}, \quad (6.11)$$

де  $\mu_{mp.j}^{(i)}$  – інтенсивність відновлення  $j$ -ї ділянки трубопроводу після виникнення відмови  $i$ -го типу, 1/рік.

Середнє напрацювання на відмову ділянки трубопроводу, год. доівнює

$$T_{cp.,j} = \frac{1}{\lambda_{mp.j}^{(i)}}. \quad (6.12)$$

### 6.3. Забезпечення конструктивної надійності й режимів роботи вуличної водовідвідної мережі

Аварії в наслідок руйнування або закупорки колектора, несправності в системі енергопостачання насосної, або очисної станцій приводять до надходження неочищених стічних вод у водоймище, і тим самим суттєво порушують його санітарний стан.

Це може викликати епідемічні захворювання людей і тварин, погіршити якість питної води, підвищити вартість її очищення, призвести до загибелі риби, мікроорганізмів, і водної рослинності у водоймищі. Отже, чим вища надійність каналізаційної системи, тим менше вірогідність виникнення аварійної ситуації або екологічної катастрофи. Проте, підвищення надійності вимагає уведення тієї або іншої форми надмірності системи, застосування матеріалів вищої якості, резервування окремих елементів системи.





Оптимальні умови роботи каналізаційної мережі забезпечуються не тільки в наслідок правильного забезпечення гідравлічного режиму в каналізаційній мережі шляхом перевірки її пропускної здатності при гідравлічних розрахунках, але й раціональним конструюванням окремих її елементів. При проектуванні каналізаційних мереж необхідно виконувати такі умови:

1) каналізаційні лінії між колодязями слід прокладати прямолінійно. У місцях зміни напрямку трубопроводів в плані (на поворотах), або на профілі (при зміні похилу прокладання труб) і в місцях приєднання однієї або декількох труб повинні бути влаштовані колодязі;

2) з'єднання труб і колекторів у колодязях виконують у вигляді відкритих лотків, із плавними лініями спряження труб у камерах колодязів;

3) труби й канали в колодязях необхідно сполучати по верху труб (шелигах) або по рівнях води. Рекомендується проводити сполучення: по верху – для труб різного діаметру; по рівнях води при – однаковому діаметрі. У випадках, коли діаметр трубопроводу на наступній ділянці менший, ніж на попередній, то сполучення трубопроводів виконується «по лотках». Для під'єднання так званих безрозрахункових ділянок, внутрішньо кварталних та дворових мереж до вуличних рекомендовано застосовувати сполучення за схемою «лоток труби-рівень води»;

4) розрахункова швидкість течії повинна зростати вздовж колектора;

5) у місцях сполучення потоків не слід допускати зустрічних течій, гідравлічних ударів струменя й підпорів;

6) наповнення в потоках, що приєднуються, повинні бути рівноважені з основним потоком води, або бути вищими, ніж в основному потоці, а швидкість меншою, ніж в основній трубі.

Основними параметрами надійності є **довговічність** і **частота аварій**. На ці параметри впливає цілий ряд чинників (табл. 6.1).

Найбільш характерні причини відмов каналізаційних мереж у % такі: від корозії зводу труб мереж – 24; стирання лотка труб – 22; руйнування колодязів – 21; руйнування тіла труб ззовні – 18; руйнування стикових з'єднань – 15.



Вплив різних чинників на довговічність каналізаційних мереж  
(за результатами досліджень І.А. Абрамовича)

№ з/п	Найменування чинників	Рівень значущості %
1	Матеріал труб мережі	18,2
2	Показники якості (склад) стічних вод	17,6
3	Швидкість руху стоків	14,8
4	Гідрогеологічні умови	14,6
5	Система провітрювання мережі	11,2
6	Конструкція і якість закладання стиків	10,0
7	Різновид системи каналізації	7,0
8	Глибина закладання труб	6,6

Усі перераховані чинники, окрім гідрогеологічних умов будівництва, значною мірою можуть варіюватися в процесі проектування.

Таким чином, надійність і довговічність колектора на 85 % залежить від професійної компетентності інженера-проектувальника. Підвищити надійність каналізаційних мереж можливо шляхом врахування чинників, що визначають її довговічність. Наприклад, слід застосовувати довговічніші й досконаліші матеріали; знижувати інтенсивність корозії; застосовувати демпфування й кільцювання мереж. Помітно підвищує надійність кільцювання мереж (на верхових ділянках) шляхом улаштування перемичок, що дозволяє перекидати стоки в разі аварії в інший колектор. Ще більше підвищується надійність при кільцюванні низових ділянок головних колекторів глибокого закладання. Така схема працює в м.Харків. Тут закільцьовані головні колектори діаметром 3,2 м, 2,5 м і 1,8 м. Перекидання вод здійснюється за рахунок підпору при аварії. Якщо кільцювання не можливе, то доводиться найбільш відповідальні колектори дублювати. Можливо також улаштування аварійних резервуарів на насосних станціях для перекачування стічної води. Рекомендується також використовувати вертикальні каналізаційні насоси. Це забезпечує незатоплюваність їхніх електродвигунів.



Внаслідок того що в стічній воді міститься багато зважених речовин, пропускна спроможність каналізаційних колекторів через шість років експлуатації зменшилася на 30% в порівнянні з початковою.

Процес зменшення пропускної спроможності підкоряється експоненціальному закону і його можна записати у вигляді

$$W = e^{-1,2610^{-3} \cdot t}, \quad (6.13)$$

де  $W$  – загальний стік;  $t$  – час експлуатації, доб.

За відмову системи умовно приймають зменшення пропускної спроможності мережі на 50% в порівнянні з початковою. Спробуємо визначити час, протягом якого пропускна спроможність системи зменшиться не більше ніж на 10%. Можна припустити, що в початковий момент часу пропускна спроможність трубопроводів була 100%, тоді в деякий момент часу вона зменшилася на 30%,

тобто в початковий момент часу  $W = e^{-1,2610^{-3} \cdot t}$ , через деякий час  $t = 0,9 \cdot W = e^{-1,2610^{-3} \cdot t}$ , отримаємо  $t = 84$  днів. Інтенсивність відмови системи та вірогідність того, що пропускна спроможність через 84 дні зменшиться не більше ніж на 10% складає

$$\lambda_c = \frac{1}{365 \cdot 6} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/доб.}, P(84) = e^{-\lambda_c \cdot t} = e^{-4,6 \cdot 10^{-4} \cdot 84} = 0,96.$$

Оскільки вірогідність досить висока, то для збереження пропускної спроможності трубопроводів їх необхідно промивати не рідше ніж один раз у три місяці. Забезпечити необхідний рівень як конструктивної так і експлуатаційної надійності вуличної водовідвідної мережі (незалежно від її призначення) складно, якщо не проаналізувати гідравлічних (а іноді механічних і хімічних) процесів, що відбуваються при транспортуванні певного виду стічних вод (або їх суміші).

Довговічність таких мереж залежить ще й від матеріалу труб, конструкції трубопроводу, виду стічних вод, гідрогеологічних умов будівництва, типу стикового з'єднання труб каналізаційних колекторів, глибини закладання, наявності ефективної системи провітрювання й тому подібне. Частота аварійних руйнувань залежить від ступеня наповнення трубопроводу, глибини закладання труб, конструкції стикового з'єднання, швидкості руху



стічної рідини, концентрації сульфідів, агресивності стічних і ґрунтових вод, температури стічних вод.

Транспортна мережа водовідведення це складна система структурно об'єднаних паралельно з'єднаних підсистем елементів, або послідовно сполучених фрагментів, що, в свою чергу, теж складаються з окремих однотипних конструктивних елементів системи (рис. 6.14). Під фрагментом ми розуміємо  $n$  разів повторювану сукупність елементів системи.

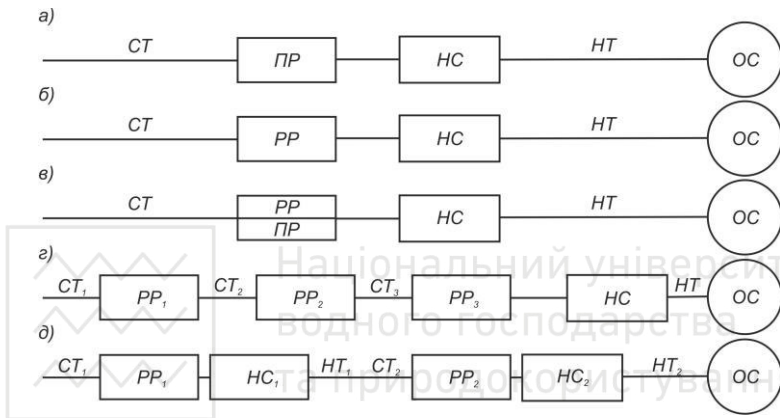


Рис. 6.14. Структура фрагментів мережі водовідведення а; б; в; г; д — фрагменти системи; СТ, PP, PP, НС, НТ, ОС — елементи системи: самопливний трубопровід, приймальний резервуар, регулюючий резервуар, насосна станція, напірний трубопровід, очисні споруди

Як було наведено в розділі 5 в сучасних умовах надійна робота систем водовідведення ґрунтується за рахунок надмірності її елементів. Так, колектори проектують на пропуск максимально можливої притоки стічних вод, і володіють значною надмірністю по пропускній спроможності. У насосних станціях передбачено резервування насосів, а для забезпечення безперервного живлення електродвигунів здійснюють їхнє енергопостачання не менше як від двох незалежних джерел. Від кожної насосної станції укладають не менше двох напірних трубопроводів. Таким чином, «гідралічна надійність» систем водовідведення дуже висока, а відмови в її роботі з'являються через недосконалу нормативну базу, яка допускає переповнювання мережі; через недоброякісне ведення



будівництва, через недоліки проектних рішень. Внаслідок цього руйнуються конструкції колекторів, а при умові низького рівня експлуатації, або некваліфікованості експлуатаційного персоналу це може привести до несподіваних катастрофічних наслідків. Так, при високих швидкостях руху води в колекторах збільшуються швидкості руху наносів (каменю, щебеню, піску й інших предметів, рухомих по дну труб), що приводить до стирання лоткової частини каналів і труб.

В даний час у практиці проектування систем водовідведення використовується найпримітивніша, але і найдорожча форма надмірності, що полягає в тому, що пропускна спроможність кожного її елемента розраховується на максимальну очікувану притоку. Тобто,  $Q_{max(m)} = q_{max(m)}$ .

При цьому  $K_{max}^{над.} = q_{max(m)} / q_{min}$  як кожного елемента окремо, так і для системи в цілому. Оскільки трубопровідні елементи системи – *НТ* і *СТ* мають значну довжину, то надмірність їхньої пропускної спроможності найбільш капіталомістка, тому й, у першу чергу, вимагає оптимізації. У свою чергу, збільшення потужності насосних станцій для перекачування стічних вод викликає удорожчення будівництва, зростання експлуатаційних витрат за рахунок «інтенсивнішого зношування» встаткування в зв'язку з частими включеннями й виключеннями насосів. Тому в систему вводять спеціальні «згладжуючі» елементи, у даному випадку регулюючі резервуари. При цьому технологічна структура елементів змінюється (рис. 6.14 б, в, г, д). Подібні рішення дозволяють зменшити надмірність тих ланок елементів систем, які розташовані після регулюючих резервуарів. При цьому, об'єм резервуару може бути підібрано таким чином, щоб коефіцієнт надмірності пропускної спроможності системи не змінився, а надмірність вхідних у систему елементів окрім (*PP*) зменшувалася.

Розглянемо фрагмент системи, представлений на рис. 6.14 д. Цей елемент (*СТ<sub>1</sub>*) розраховується традиційно на  $q_{розр.} = q_{max}$ , елемент (*PP<sub>1</sub>*) згладжує до необхідного ступеня нерівномірність притоки (*СТ<sub>1</sub>*), при цьому якщо об'єм резервуару  $W \rightarrow max$ , то  $q_{розр.} \rightarrow q_{сер.}$ . Таким чином, елемент (*НС<sub>1</sub>*) залежно від  $W$  розраховується із умови, що  $q \leq q_{НС1}$ .



Так ( $HC_1$ ) — перший елемент, надмірність якого зменшилася з введенням ( $PP_1$ ) на величину  $\Delta q_n = q_n - q_{HC.розр.}$ , тобто, на різницю між номінальною продуктивністю насоса і годинним розрахунковим значенням відкачування  $q_{HC.розр.}$  і т.і.

У результаті таких послідовних підрахунків, зменшиться максимальна притока на очисні споруди (ОС), що дозволяє дещо зменшити об'єми окремих споруд.

Таким чином, при новому будівництві введення в систему елементів, що згладжують нерівномірність притоку стічних вод у мережу, дозволяє зменшити діаметри самопливних і напірних трубопроводів, скоротити будівельний об'єм, і потужність насосних станцій, а також об'єм окремих очисних споруд. Крім того, зниження потужностей електродвигунів насосних агрегатів дозволяє економити енергетичні ресурси.

Підвищення надійності транспортуючої вуличної каналізаційної мережі може відбуватися в період її реконструкції. Як правило, при реконструкції проводять або укладання додаткових (розвантажувальних) колекторів, або будують так звані перехоплюючі колектори, а насосні станції розширюють, або заміняють устаткування (якщо дозволяють габарити станції). Однак, можливе також підвищення надійності вуличної мережі шляхом зміни її схеми трасування (або окремих її ділянок). Розглянемо один із методів зміни схеми трасування, запропонований А.Я. Наймановим

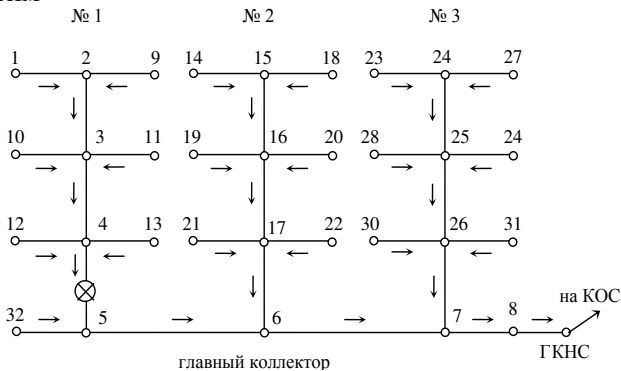


Рис. 6.15. Традиційна схема каналізаційної мережі: (5-6-7-8-ГКНС) - головний колектор; (2-3-4-5), (15-16-17-6), (24-25-26-7) - бічні колектора; решта ділянок - вуличні лінії; ГКНС – головна насосна станція; КОС – каналізаційні очисні споруди.



Підвищення надійності мережі шляхом зміни її схеми можливе або при дублюванні головного й бічного колекторів, або зміною тупикової схеми трасування на кільцеву. Дублювання колекторів можна виконати з улаштуванням перемичок між паралельними лініями (між вуличними колекторами). Це забезпечує високу надійність мережі, однак вимагає підвищених матеріальних і фінансових витрат у зв'язку зі значним збільшенням довжини трубопроводів. Кільцева схема мережі не вимагає такого збільшення загальної довжини колекторів, тому виявляється більш привабливою. Рух стічних вод від будь-якої вузлової точки мережі можливий тільки по одному напрямку руху стічної води (шляху) і при будь-якій аварії на цьому шляху призведе до відмови вище розташованих ділянок, бо резервування тут відсутнє. Відмова кінцевих ділянок головного колектора (7- 8 й 8 - ГКНС), а також головної каналізаційної насосної станції призводить до відмови всієї мережі. Просте влаштування перемичок між вузловими точками 9 і 14, 11 і 19, 13 і 21, а також між 18 і 23, 20 і 28, 22 і 30 без зміни діаметрів перемкнутих ліній, що кільцюються, не може значно підвищити надійність мережі. Лінії (2-9 і 14-15, 3-11 і 19-16 і т.д.), які кільцюють перемиканнями, звичайно, мають найбільші діаметри, і не можуть забезпечити перекидання всіх стоків від пошкодженого бічного колектора в сусідній колектор.

Бічні колектори повинні бути сполучені перемичками, діаметри яких сорозмірні з діаметрами колекторів. У такому разі, кільцювання каналізаційної мережі перетворює її на аналог кільцевої замкненої мережі, подібної до магістральної водопровідної мережі (Рис. 6.16).

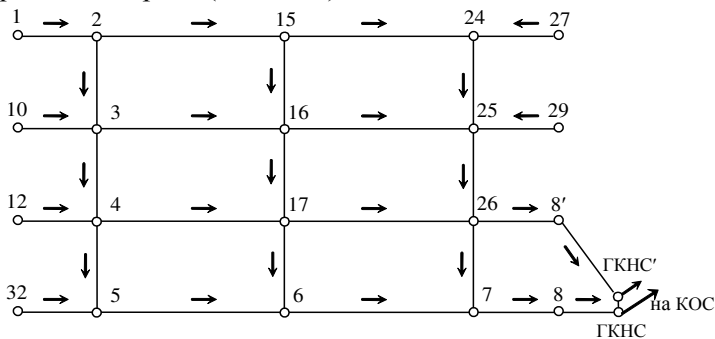


Рис. 6.16. Схема кільцевої каналізаційної мережі



Зрозуміло, при цьому повинні враховуватися рельєф місцевості й необхідність забезпечення самопливного руху стічних вод. Бажано забезпечити приблизно рівномірний розподіл витрат води між лініями мережі, щоб забезпечити однакову значущість ділянок.

Цього можна досягти шляхом зміни діаметрів і переобладнання каналізаційних насосних станцій, зміни ухилів ліній. Обов'язкове влаштування не менше двох головних напрямків руху стічної води.

Для чисельної оцінки надійності мережі необхідне складання її структурно-логічної схеми (рис. 6.17).

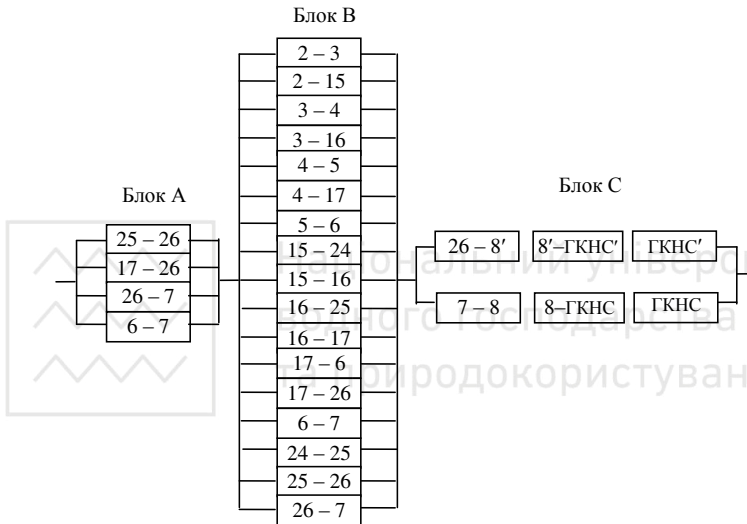


Рис. 6.17. Структурно-логічна схема кільцевої каналізаційної мережі

При складанні схеми врахуємо, що відмова будь-якої ділянки кільцевої мережі не приводить до відмови інших ділянок. Звідси витікає, що всі ділянки мережі в структурно-логічній схемі повинні бути сполучені паралельно. Тільки одночасна відмова ділянок, прилеглих до вузлів 7 і 26 може призвести до відмови всієї мережі.

Тупикові ділянки не включені в схему (1-2, 10-3 тощо), оскільки вони все ж впливають на надійність мережі. Відзначимо, що велика кількість паралельно включених елементів значно підвищує надійність мережі.

Кількісними параметрами надійності є коефіцієнт готовності системи  $K_2$  і напрацювання на відмову  $T_0$ , а допоміжними





параметрами є вірогідність безвідмовної роботи  $P$  і середній час відновлення (ремонту)  $T_0$ . Для ділянок мережі вони обчислюються за формулами

$$K_{zi} = \left( \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \right)^{L_i}; P_i = e^{-\lambda_i L_i t_i}; T_{oi} = \frac{1}{\lambda_i L_i}; T_{0,i} = T_0 \cdot \frac{1 - K_{z,i}}{K_{z,i}}, \quad (6.15)$$

де  $\mu_i$  – інтенсивність відновлення 1 км  $N$  трубопроводу, 1/год·км;  
 $\lambda_i$  – інтенсивність відмов 1 км трубопроводу, 1/год·км;  $L_i$  – довжина  $i$ -ї ділянки каналізаційної мережі, км;  $t_i$  – час, год.

Величини  $\lambda_i$  і  $\mu_i$  вибирають із довідкової літератури залежно від матеріалу й діаметру труб на ділянці. Час  $t_i$  призначається рівним  $(t_{e,i} + 1)$ , де  $t_{e,i}$  – тривалість експлуатації  $i$ -ї ділянки мережі від моменту пуску до моменту спостереження за надійністю (років), якщо трубопровід новий, то  $t_{e,i} = 0$ .

Для обчислення параметрів надійності всієї мережі ( $K_z$  і  $T_0$ ) доцільне використання методу «структурної декомпозиції і еквівалентування».

Його суть полягає в спрощенні структурно-логічної схеми шляхом об'єднання елементів у блоки, які еквівалентні цій сукупності елементів. У даній структурно-логічній схемі елементи можна об'єднати в 3 блоки: **блок А**, **блок В** і **блок С**. Ці блоки сполучені послідовно. Оскільки параметри надійності ( $K_z$ ,  $P$ ,  $T_0$  і  $T_0$ ) кожного елементу вже відомі після обчислення по формулі (6.13), а визначення параметрів надійності блоку може бути зведене до простих операцій. Наприклад, для блоку **А** спочатку обчислюємо коефіцієнти готовності  $K_{z(25-26-17-26)}$  двох паралельно сполучених елементів (25-26) і (17-26) за формулою

$$K_{z(25-26-17-26)} = K_{z(25-26)} + K_{z(17-26)} - K_{z(25-26)} \cdot K_{z(17-26)}, \quad (6.16)$$

Аналогічно обчислюємо коефіцієнт готовності  $K_{z(26-6-7)}$  двох паралельно сполучених елементів (26-7) і (6-7) і далі коефіцієнт готовності блоку  $K_{z(A)}$

$$K_{z(A)} = K_{z(25-26-17-26)} + K_{z(26-7-6-7)} - K_{z(25-26-17-26)} \cdot K_{z(26-7-6-7)}, \quad (6.17)$$

Ймовірність безвідмовної роботи блоку **А** визначається

$$P_A = 1 - [(1 - P_{25-26}) \times (1 - P_{17-26}) \times (1 - P_{26-7}) \times (1 - P_{6-7})], \quad (6.18)$$



Знаючи, чому дорівнюють  $K_{z(A)}$  і  $P_A$  можемо визначити  $\mu_A$  і  $\lambda_A$ , а також  $T_{O(A)}$  і  $T_{B(A)}$  за допомогою формул (6.13).

Для блоку **B** величини  $K_{z(B)}$  і  $P_B$  можна вважати вельми близькими до 1 і умовно можна прийняти, що  $K_{z(B)} \approx 1$ ,  $P_B \approx 1$ . Це пов'язано з великою кількістю паралельно сполучених елементів, а відтак і високою надійністю.

Параметри надійності насосних станцій ГКНС і ГКНС необхідно визначати окремо.

Для блоку **C** спочатку визначається  $K_{z(C)}$  і  $P_{(C)}$  для послідовно сполучених елементів (26-8'), (8'-ГКНС') і (ГКНС')

$$K_{z(C')} = K_{z(26-8')} \cdot K_{z(8'-ГКНС')} \cdot K_{z(ГКНС')} , \quad (6.19)$$

$$P_{(C')} = P_{(26-8')} \cdot P_{(8'-ГКНС')} \cdot P_{(ГКНС')} . \quad (6.20)$$

Аналогічно і для елементів (7-8), (8-ГКНС) і (ГКНС)

$$K_{z(C'')} = K_{z(7-8)} \cdot K_{z(8-ГКНС)} \cdot K_{z(ГКНС)} , \quad (6.21)$$

$$P_{(C'')} = P_{(7-8)} \cdot P_{(8-ГКНС)} \cdot P_{(ГКНС)} , \quad (6.22)$$

далі, 
$$K_{z(C)} = K_{z(C')} + K_{z(C'')} - K_{z(C')} \cdot K_{z(C'')} , \quad (6.23)$$

$$P_C = 1 - \left[ (1 - P_{(C')}) (1 - P_{(C'')}) \right] , \quad (6.24)$$

і остаточно 
$$K_{z(\text{мережі})} = K_{z(A)} \cdot K_{z(B)} \cdot K_{z(C)} , \quad (6.25)$$

$$P_{(\text{мережі})} = P_A \cdot P_B \cdot P_C . \quad (6.26)$$

Знаючи  $K_z$  і  $P$  можна обчислити  $T_o$  й  $T_B$  для мережі. Далі ці величини слід порівняти з нормативами надійності до систем водопостачання даної категорії, оскільки водопровід і каналізація є достатньо жорстко пов'язаними системами. При реконструкції систем водовідведення як альтернативний варіант доцільно розглядати влаштування регулюючих (згладжуючих) резервуарів, про які йшлося раніше.

З технічної точки зору критерієм для ухвалення рішення про влаштування регулюючого резервуару (замість розширення насосної станції і очисних споруд) є відношення додаткової середньої витрати  $q_{\text{сер.}(дод)}$  до надмірності елемента в точці можливого згладжування нерівномірності, яка, в свою чергу,



дорівнює різниці між максимальною пропускною спроможністю і середньою притокою  $Q_{\max} - q_{\text{ср}}$ .

$$\frac{q_{\text{ср.}(доод)}}{Q_{\max} - q_{\text{ср}}} \leq 1. \quad (6.27)$$

Якщо це відношення менше, або дорівнює одиниці, то збільшити пропускну спроможність можна шляхом уведення в систему регулюючого резервуару. Якщо ця нерівність не дотримана, то необхідна істотна реконструкція (наприклад, збільшення пропускної спроможності самопливного й напірних трубопроводів і реконструкція насосної станції).

В тому випадку, якщо це співвідношення не може бути задоволене на перспективу, можливо, що воно прийнятне на ближні 5 - 10 років, що дозволить з мінімальними витратами і в короткий термін забезпечити каналізування нового житлового району або підприємства.

#### Контрольні запитання

1. З яких етапів складається методика дослідження надійності трубопроводних систем?
2. Яка мета анкетування експлуатаційних підприємств?
3. Які звітні документи заповнює експериментатор для аналізу потоку відмов трубопроводних систем?
4. Яка інформація обов'язкова для занесення у «Журнал аварійності трубопроводної системи»?
5. Що таке «Разова реєстраційна картка» та мета її заповнення?
6. Вміст «Картки ремонтної ділянки» мережі.
7. Які принципи покладено в основу класифікації відмов трубопроводів систем водопостачання і водовідведення?
8. За якими впливовими факторами систематизують потік відмов трубопроводної системи?
9. Які впливові фактори можна віднести до конструктивних?
10. Які фактори відносять до об'єктивних та суб'єктивних?
11. За якими основними ознаками систематизують відмови трубопроводів водопостачання і водовідведення?
12. Як класифікують відмови трубопроводів за складністю відновлення і масштабом шкоди від їхньої появи?
13. На які періоди можна поділити один цикл експлуатації трубопроводу?



## 7. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАПІРНО - РЕГУЛЮВАЛЬНИХ СПОРУД ТА НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

### 7.1. Надійність напірно регулювальних споруд

Напірно-регулювальні споруди в більшості випадків є резервними спорудами, які забезпечують накопичення певних об'ємів води. У системах водопостачання широко використовують ємкісні споруди, які призначені для зберігання запасних, регулювальних, запасно-регулювальних об'ємів води. Використання напірно-регулювальних споруд (резервуарів чистої води, водонапірних башт, колон і водоповітряних напірних баків) важливо для забезпечення надійності водопостачання, забезпечення сумісної роботи споруд із різною продуктивністю й призначенням, для регулювання подачі води в систему, а також для зниження будівельних і експлуатаційних затрат тощо. У системах комунального водопостачання резерв води у відповідних ємкостях передбачається для забезпечення рівномірної роботи споруд, періодичної промивки споруд станцій очищення води, подачі додаткових кількостей води в мережу міста й для потреб пожежогасіння (як із зовнішніх гідрантів, так і для пожежогасіння зі внутрішніх пожежних кранів). У системах виробничого водопостачання використовуються різні запасні ємкості відповідно до специфічних потреб технологічних процесів, а також резервні ємкості для забезпечення нормальних функцій водозабезпечення в аварійних ситуаціях. У системах водовідведення обов'язково на насосних станціях передбачаються резервуари для накопичення стічних вод, які нерівномірно надходять від об'єкту водовідведення, і надання умов для роботи насосів.

Можливість, доцільність і економічність такого використання ємкості для підвищення надійності систем водозабезпечення та водовідведення залежать від асортименту, можливого розташування, і поєднання окремих споруд систем, а також ряду місцевих умов. З точки зору забезпечення надійного водопостачання, існує класифікація напірно-регулювальних споруд за способом подавання води в систему: *активні*, або напірні, які здатні самі віддавати воду, *пасивні*, або безнапірні, з яких вода повинна забиратися насосами.



Як було доведено в розділі 1 (п.1.4), одним із найефективніших методів підвищення надійності системи водопостачання є резервування її окремих споруд, підсистем і елементів. У таких випадках слід проводити її технологічний розрахунок як для режиму нормального функціонування системи, так і для найбільш вірогідних небезпечних відмов (наприклад, за складністю відновлення та обсягами нанесеної ними шкоди). При цьому враховується час відновлення окремих елементів при технічній забезпеченості служби експлуатації системи. Ураховуючи сумісний характер роботи ємкісних споруд та водоводів у складі СПРВ слід розглядати тимчасове резервування, яке полягає в зберіганні аварійних запасів води в РЧВ, як один зі методів одночасного підвищення надійності як водоводів так і ємкісних споруд. При тимчасовому резервуванні на водоводі в одну нитку в його кінцевій точці влаштовують резервуари. Вони можуть бути влаштовані або активними (напірними), або пасивними (безнапірними). Об'єм такого запасу можна визначити з урахуванням рекомендацій

$$W_{ав.} = 3,6 \cdot (Q_{ав.} \cdot T_{ав.} + 3,6 \cdot Q_{пож.} \cdot T_{пож.}), \quad (7.1)$$

де  $Q_{ав.}$  – аварійні витрати води, що подаватимуться по водоводу під час ліквідації аварії на ньому, л/с.

$$Q_{ав.} = 0,7 \cdot Q_{г-п} + \sum Q_{пр.ав.}, \quad (7.2)$$

де  $Q_{г-п}$  – сумарні витрати води на господарсько-побутові потреби населення, та для потреб працівників промислових підприємств, л/с;  $T_{ав.}$  – тривалість ліквідації аварії на водоводі, год;  $Q_{пож.}$  – витрати води на пожежогасіння, л/с;  $T_{пож.}$  – розрахункова тривалість гасіння пожеж, год ( $T_{пож.} = 3$  год).

Для оцінки надійності складається структурна схема системи (Рис. 7.1).

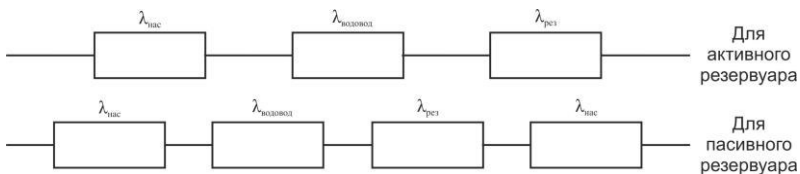


Рис. 7.1. Логічно-структурна схема водоводу.



Імовірність безвідмовної роботи обчислюється як для системи з послідовним з'єднанням елементів

$$P(t) = P_{нас.}(t) \cdot P_{вод.}(t) \cdot P_{рез.}(t). \quad (7.3)$$

Для *активного резервуару*  $P(t) = e^{\lambda_{\epsilon} \cdot L_{\epsilon} \cdot t}$ . Тут у  $\lambda_{\epsilon}$  включені трубопровід і арматура. Ю.О. Ільїн [11] рекомендує для розрахунків використовувати формулу

$$P(t) = e^{\frac{\alpha \cdot \gamma \cdot t}{1 + \gamma_1 + \gamma}}, \quad (7.4)$$

де  $\gamma = \lambda / \mu$ , а  $\lambda$  і  $\mu$  – відповідно інтенсивність відмов і ремонтів водоводу

$$\alpha = \frac{\delta^2}{t_{\text{дод.}} \cdot [\delta^2 + (e^{\delta} - \delta - 1) \cdot \mu \cdot t_{\text{дод.}}]}, \quad (7.5)$$

$$\delta = \mu \cdot t_{\text{дод.}} - \lambda \cdot t_n, \quad (7.6)$$

де  $t_{\text{дод.}}$  – час, на який створений запас води, год, його слід приймати рівним встановленому часу ліквідації аварії на водоводі  $t_{\text{дод.}} = T_{ав.}; m$  – тривалість поповнення резервуару після його спорожнення у разі аварії;  $\gamma_1$  – проміжний підстановочний коефіцієнт

$$\gamma_1 = \frac{\alpha}{\mu}, \quad (7.7)$$

де  $t$  – розрахунковий період, за який оцінюється надійність.

На величину  $P(t)$  суттєво впливає об'єм аварійного запасу води, і відповідно час  $t_{\text{дод.}}$ . Запас води в резервуарі повинен забезпечувати подачу води протягом періоду ліквідації аварії на водоводі в одну нитку. Згідно норм розрахунковий час ліквідації аварії на водоводах систем водопостачання I категорії представлений у табл. 7.1.

У таблиці 7.2 наведений характер зміни  $P(t)$  залежно від аварійного запасу води і розрахункового часу  $t$  для оцінки надійності.

Оцінки обчислені для водоводу із сталевих труб  $d_v = 600$  мм при  $\lambda(t) = 1 \cdot 10^{-2}$  1/км·рік і тривалості ремонту  $T_{ав.} = 24$  години, довжина водоводу  $L_{вод.} = 5$  км. Запас води за 72 години дозволяє досягти



$P(t) > 0,95$  за один рік. Це вимагає достатньо значних капіталовкладень, особливо у разі , якщо розглядаються водоводи великої пропускної здатності.

Таблиця 7.1

Тривалість ліквідації аварій,  $T_{ав.}, год.$ , на водоводах I категорії

Діаметр труб, мм	Розрахунковий час ліквідації аварій на трубопроводі, год., при глибині залягання труб	
	до 2 м	більше 2 м
до 400	8	12
400-1000	12	18
більше 1000	18	24

**ПРИМІТКА:** Для водоводів II і III категорії тривалість ліквідації аварій слід збільшувати відповідно в 1,25 і 1,5 разів.

Таблиця 7.2

Показники надійності для водоводу в одну нитку залежно від тривалості, на яку створено аварійний запас води  $t_{од.}$

Розрахунковий період для оцінки надійності, $t$ , рік	Імовірність безвідмовної дії $P(t)$ водоводу в одну лінію з резервуаром в кінці та з аварійним запасом води на час $t_{од.}$ , год.				
	24 год.	48 год.	72 год.	96 год.	120 год.
0,5	0,89	0,96	0,985	0,994	0,998
1	0,81	0,92	0,975	0,989	0,996
2	0,65	0,85	0,942	0,98	0,94

Водонапірні башти використовують найчастіше для зберігання регульовальних і пожежних запасів води. При великих об'ємах баків башт можна встановлювати декілька башт, концентруючи споруди на одному майданчику, або ж розкиданими по території населеного пункту, чи підприємства.

Однак, недоліком уведення резерву для водонапірних башт є той факт, що недоторканий протипожежний запас води (разом із регульовальним) рівномірно розподіляється між усіма баштами. А це означає, що в разі можливого відключення однієї споруди (башти) на ремонт (наприклад, у разі аварії, або профілактичного ремонту) деяка частина пожежного об'єму не може бути

використана для пожежогасіння, що значно зменшує надійність всієї системи водопостачання.

Протипожежний об'єм води, який зберігається в бачі башти визначається з розрахунку гасіння однієї зовнішньої та однієї внутрішньої пожежі протягом 10 хв. з одночасним максимальним відбором води з водопровідної мережі  $q_{p.max}$  за формулою, м<sup>3</sup>

$$W_{n.б.} = 0,6 \cdot (q_{p.max} + q_{n.з.} + q_{n.в.}), \quad (7.8)$$

де  $q_{c.max}$  – розрахункові витрати води на господарсько-питні й виробничі потреби в години максимального споживання води, л/с;  $q_{n.з.}$ ,  $q_{n.в.}$  – розрахункові витрати води для гасіння відповідно однієї зовнішньої і однієї внутрішньої пожеж, л/с.

$$\Delta W_{n.б.} = \frac{1}{m_{б.}} \cdot W_{n.б.}, \quad (7.9)$$

де  $m_{б.}$  – кількість робочих баків башт, шт;  $W_{n.б.}$  – розрахунковий об'єм недоторканого протипожежного запасу води, що передбачається зберігати в башті, м<sup>3</sup>. При цьому логічно передбачити, що при зростанні числа споруд (башт) величина  $\Delta W_{n.б.} \rightarrow \min$ .

Таблиця 7.3

Велчина фактичного зменшення протипожежного об'єму води в башті,  $\Delta W_{n.б.}$ , %, у разі відключення одного робочого баку на ремонт

$m_{б.}$	1	2	3	4	5
$\Delta W_{n.б.}$ , %	100	50	33	25	20

Аналіз таблиці доводить, що тільки в разі значної кількості споруд (башт) можна досягти суттєвого зменшення втрати протипожежного запасу, а це економічно (та іноді й технічно) неможливо, або недоцільно. У таких випадках доведеться утримувати в наявних резервуарах додатковий протипожежний об'єм води

$$W_{n.p.} = W_{нож.p.} + \Delta W_{n.б.}, \quad (7.10)$$

Резервуари чистої води (РЧВ) призначені для зберігання таких запасів води: регульовального, недоторканого протипожежного, на власні потреби водоочисної станції, аварійного. Для забезпечення надійності водопостачання в одному вузлі повинно бути не менше двох резервуарів одного призначення. В усіх резервуарах відповідні





рівні регулювальних, пожежних, аварійних та інших об'ємів води мають бути на однакових геодезичних відмітках. При відключенні одного резервуара в інших повинно зберігатись не менше 50 % від розрахункового пожежного й аварійного запасів води. Улаштування одного резервуара можливе тільки при відсутності в ньому пожежного й аварійного об'ємів води. Для запобігання промерзання води взимку й прогрівання влітку передбачається ґрунтове обвалування з товщиною шару не менше 0,5 м. З метою запобігання застійних явищ води в РЧВ передбачено виконувати обмін води та подавати її в РЧВ з іншого боку, ніж бік, з якого проводиться відбирання води з додатковим розміщення в резервуарі перегородок. Повний об'єм РЧВ, який передбачено розмістити, як правило, на одному водопровідному майданчику з іншими водопровідними спорудами (станцією поліпшення якості води, водопровідними насосними станціями) складає

$$W_{РЧВ} = W_{р.р.} + W_{ав.} + W_{н.р.} + W_{в.н.}, \quad (7.11)$$

де  $W_{р.р.}$  – регулювальний об'єм, який залежить від графіків подачі і відбору води з НРС (напірно-регулювальної споруди),  $\text{м}^3$ ;  $W_{ав.}$  – аварійний запас води (залежить від тривалості ліквідації аварій і розрахункових витрат подачі води споживачам у випадку позаштатних ситуацій,  $\text{м}^3$  (передбачається у разі необхідності);  $W_{н.р.}$  – протипожежний запас води (залежить від розрахункової кількості пожеж та пожежених витрат води на їхнє гасіння, тривалості гасіння пожеж),  $\text{м}^3$ ;  $W_{в.н.}$  – запас води на власні потреби водопроводу (залежить від місця розташування НРС в системі водопостачання, періодичності промивки і регенерації очисних споруд, загального об'єму НРС, та інш.).

Повний розрахунковий регулювальний об'єм резервуара,  $\text{м}^3$ ,

$$W_{р.р.} = W_{рег.р.} + \Delta W_{рег.б.}, \quad (7.12)$$

де  $W_{рег.р.}$  - розрахунковий регулювальний об'єм РЧВ,  $\text{м}^3$

$$W_{рег.р.} = Q_{р.доб.} \cdot \left[ 1 - K_n + (K_2 - 1) \cdot \left( \frac{K_n}{K_2} \right)^{\frac{K_2}{K_2 - 1}} \right], \quad (7.13)$$

де  $K_n$  – максимальний коефіцієнт погодинного подавання води в резервуар чи насосними станціями;  $K_2$  – максимальний погодинний коефіцієнт водоспоживання.



Коефіцієнти  $K_H$  і  $K_2$  визначені на основі графіків подавання й відбирання води із РЧВ (найчастіше це графік роботи насосної станції I підйому ( $K_H$ ) і графік роботи насосної станції II підйому  $K_2$ ).

$\Delta W_{рег.б.}$  – додатковий регулювальний об'єм, м<sup>3</sup>, на який зменшено об'єм башти за рахунок саморегулювальної здатності відцентрових насосів,  $\Delta W_{рег.б.} = \gamma \cdot W_{рег.б.}$ .

При цьому регулювальний об'єм води в РЧВ біля насосної станції II підйому треба збільшити на величину  $\Delta W_{рег.б.}$ .

При двоступеневому графіку роботи насосної станції II підйому і рівномірному подаванні води в РЧВ  $W_{рег.п}$  можна визначати також за формулою

$$W_{рег.п} = \frac{(P_2 - 4,17) \cdot T_2}{100} \cdot Q_{р.доб.} = \frac{(4,17 - P_1) \cdot T_1}{100} \cdot Q_{р.доб.}, \quad (7.14)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – подача води насосами відповідно 1-го і 2-го ступеня, % від  $Q_{р.доб.}$ ;  $T_1$  і  $T_2$  — тривалість роботи насосів 1-го і 2-го ступеня, год, причому  $T_1 = 24 - T_2$ .

Однак, для забезпечення надійної роботи насосів II-го підняття мінімальний регулювальний об'єм РЧВ у разі, якщо графіки подавання і відбирання води з РЧВ збігаються, не повинен бути меншим за

$$W_{рег.п} = (0,5...1) \cdot Q_{НС2}, \quad (7.15)$$

де  $Q_{НС2}$  – максимальна погодинна подача насосів II підняття, м<sup>3</sup>/год.

Протипожежний об'єм у резервуарах передбачають тоді, коли на насосній станції встановлені пожежні насоси, або інші пристрої, що забирають воду із РЧВ з метою гасіння пожеж. Протипожежний об'єм води в РЧВ слід поповнювати під час відбору води з них пожежними насосами у випадку пожежогасіння. При цьому в системах водопостачання I і II категорій допускається, відповідно до [25] поповнення запасів води в РЧВ на весь час гасіння пожежі, тобто:  $T_{пож.} = 3$  год. (система водопостачання I категорії), або  $T_{пож.} = 2$  год (для II, III категорії)

$$W_{н.п} = T_{пож.} \cdot (3,6 \cdot q_{пож.} - Q_{ВОС}) + W_{зосн.}, \quad (7.16)$$



де  $q_{\text{пож.}}$  — витрати води на гасіння розрахункової кількості пожеж у населеному пункті, л/с;  $Q_{\text{ВОС}}$  — надходження води в РЧВ від станції водоочищення, або насосної станції I-го підняття (водозабірних споруд), м<sup>3</sup>/год (режим поповнення протипожежного запасу); 3,6 — коефіцієнт переведення літрів за секунду (л/с) у кубічні метри за годину (м<sup>3</sup>/год);  $W_{\text{госп.}}$  — об'єм води, м<sup>3</sup>, що споживається за три (чи дві) суміжні години, тобто в терміни пожежогасіння, для годин найбільшого водовідбору води з мережі на невідкладні господарські й виробничі цілі

$$W_{\text{госп.}} = \sum_1^{T_{\text{пож.}}} Q_{\text{госп.}} - W_{\text{невр.}}, \quad (7.17)$$

де  $Q_{\text{госп.}}$  — погодинні витрати води з водопровідної мережі в години гасіння пожеж, м<sup>3</sup>/год, що витрачаються максимально на всі господарські потреби міста;  $W_{\text{невр.}}$  — об'єм води, який не враховують під час гасіння пожеж (наприклад, прийняття душу, миття й поливання територій на підприємствах та ін.), м<sup>3</sup>.

Якщо вода в РЧВ подається по *одній нитці водоводу*, то *пожежний об'єм* необхідно збільшити вдвічі.

Витрати води на власні потреби станції підготовки води визначають на основі детальних розрахунків витрат води на промивання фільтрів, скидання мулу, приготування реагентів і т. ін.

Наявність об'єму води «на власні потреби» забезпечує достатній рівень надійності роботи станції поліпшення якості води за рахунок зменшення тривалості простою під час промивок і регенерації очисних установок, збільшення інтенсивності промивки та, у кінцевому рахунку, запобігає погіршенню якості води на виході з них.

Аварійні запаси води передбачаються у резервуарах, які розміщені в кінці водоводу, прокладеного в одну нитку. При цьому необхідно забезпечити подавання води на господарсько-питні потреби в розмірі не менше 70 % розрахункових середніх погодинних витрат, а на виробничі потреби — за аварійним графіком.

Важливе значення для забезпечення надійності РЧВ мають глибини, що займають розрахункові об'єми в РЧВ, що дозволяє запобігти раптовому переповненню споруди та руйнації огороджуючих конструкцій. Максимальний рівень води в



резервуарі, як правило, перевищує позначку землі на 0,5...1 м, що забезпечує можливу фільтрацію води з резервуара в прилеглий ґрунт (а не навпаки) і сприяє збереженню високої якості води в споруді. Для забезпечення надійного засмоктування води протипожежними насосами важливо зменшити до мінімуму втрати напору у всмоктувальних комунікаціях, і оптимальне розміщення геодезичної позначки осі цих насосів (рекомендується щоб насоси розміщувались «під заливом»). Це можна досягти в т.ч. оптимальним розміщенням осі насосів (а саме всмоктувальної лінії) вище від позначки дна РЧВ.

Резервуари виконують заглибленими в ґрунт, або напівзаглибленими, і рідше наземними. Це дозволяє запобігати прогріванню води влітку, промерзанню взимку. Крім того, резервуари обваловують ґрунтом місцевого видобутку. У цьому випадку найменшу будівельну вартість мають напівзаглиблені резервуари. У випадку високого розташування рівнів ґрунтових вод (особливо забруднених радіонуклідами) та й підземних вод (в районах Чорнобильської зони) резервуари слід улаштувати наземними. Вентиляційні труби забезпечують вентиляцію простору над поверхнею води в РЧВ. На сьогодні такі труби обов'язково обладнують спеціальними всмоктувальними фільтрами-поглиначами для автоматичного обміну й очищення повітря від радіоактивних та інших забруднень із навколишнього повітря. На трубопроводі для відбирання води на господарсько-питні потреби обов'язково необхідно передбачати пристрої для збереження непорушності пожежного запасу. Періодично резервуари промивають, і дезінфікують для забезпечення відповідної якості води поданої системою до споживача.

## 7.2. Обґрунтування технологічної надійності насосних станцій

Насосні станції, звичайно, обладнаються насосами типу К, НД, Д, НЦС, В, МС, АТН, ЕЦВ, або аналогічними за напірно-витратними характеристиками насосами закордонного виробництва.

Безперебійність їхньої роботи досягається

1) відповідним вибором насосного встаткування за напорами, витратами й конструктивним виконанням;



2) високою якістю конструкції встаткування, запірної арматури, та їхнього монтажу.

**Відмови** насосного агрегату поділяються на *відмови механічної частини та відмови електричної частини*. Тривалість наробітку насосів на відмову значною мірою визначається *зношуванням обертових поверхонь, вібрацією, розбалансуванням, корозією*. У меншій мірі на аварійність насосних агрегатів впливають їхні *базові деталі*: корпусу, кришки, стійки. Вони *масивні, нерухомі* й, зазвичай, виконують своє призначення протягом усього строку експлуатації. В електричній частині причинами відмови можуть бути *пробій ізоляції ротора або статора електродвигуна, ушкодження лабораторних ущільнень і т.п.* Електродвигуни виходять із ладу в основному через *ушкодження обмотки – 85...95%*, відмови внаслідок *зносів підшипників* складають усього **5...15%**. Основна причина відмов (**50%**) – *недоліки експлуатації*, головним чином, недостатнього захисту електродвигунів (часто виходять із ладу *плавкі вставки*). В **80%** випадків відмови відбуваються *через роботу електродвигунів на двох фазах*. У процентному співвідношенні відмови насосів *заглибних насосів (ЕЦВ)*, якими обладнують насамперед насосні станції I-го підняття, розподіляються на зношування упорних підшипників – 52,6%; зношування робочих коліс – 36,8%; зношування радіальних підшипників; дефекти корпусних деталей по 5,3% відповідно.

Розподіл відмов між елементами насосів марок НД і К – зношування підшипників ковзання – 60%; зношування робочих коліс – 23%; зношування валу – 14%; дефекти корпусних деталей – 3%. В електричній частині причинами відмов може бути *пробій ізоляції ротора або статора електродвигуна, пошкодження ущільнювачів тощо*.

Залежно від рівня нормативних вимог до надійності подачі води насосні станції поділяються на **три категорії**:

- ▶ насосні станції, які з певною довірчою ймовірністю **не повинні допускати перерви** у подачі води при розрахункових режимах і тривалості експлуатації. За даними І.І. Науменко припустимий *рівень надійності рекомендується* приймати  $P_{дон.}=0,999$  (імовірність безвідмовної дії);



- ▶ станції, які **допускають** із певною ймовірністю **зниження витрати, напору**, а також припускають *перерву в подачі води на час включення резервного енергопостачання* обслуговуючим персоналом. Рекомендується  $P_{доп.} = 0,99 - 0,98$  (*перерва 10 хв.*);
- ▶ станції, які **допускають** із певною ймовірністю **зниження витрати й напору**, а також *перерви в її подачі* на час ліквідації аварії, але не більше 1 доби –  $P_{доп.} = 0,98 - 0,90$ .

Взагалі, насосні станції завжди є *відновлюваними резервованими* системами. Більшість елементів насосів замінюють після профілактичного або капітального ремонту, чи відновлення після аварії, тобто сам насос відновлюється. Закордонні виробники насосів вивчають навіть місця найбільшого зносу елементів насоса й роблять їх більш посиленими й надійними, наприклад, у колесах насосів виконують спеціальні вставки в місцях найбільшого зносу, що значно підвищує вартість насоса, але й збільшує час напрацювання на відмову.

На практично всіх водопровідних і каналізаційних насосних станціях передбачаються резервні насосні агрегати. Кількість їх залежить від *категорії надійності* насосної станції й кількості основних технологічних насосних агрегатів. З підвищенням категорії надійності насосної станції підвищується й кількість резервних насосних агрегатів. Так, на водопровідній насосній станції при кількості насосних агрегатів до шести та для другої категорії її надійності встановлюється один резервний, а для першої – два [25], на каналізаційних насосних станціях резерв ще більший, при одному робочому насосному агрегаті та для другої категорії передбачається один резервний, а для першої – два [26]. При заборі підземної води свердловинами із зануреними насосами передбачається резерв свердловин при загальній кількості свердловин більше 13 шт. – 20% із надлишком від їхньої робочої кількості для першої категорії, та 10% – для другої.

### 7.3. Визначення показників надійності насосних станцій

У теперішній час насоси основну частину всього часу експлуатації працюють в автоматизованому режимі, з керуванням їхніми режимами роботи з диспетчерського пункту. Лише

періодично (через установлений розрахунками й уточнений у процесі експлуатації) час виконуються профілактичні роботи, поєднані, при необхідності, з ремонтом устаткування. Для оцінки показників надійності роботи насосів у таких режимах може використовуватися розрахункова модель, яка припускає, що середній час ремонту устаткування приймається з урахуванням часу прибуття на станцію ремонтників для виконання профілактичних робіт. Годі, імовірність безвідмовної подачі розрахункової витрати насосами,  $P(t)$ , середній наробіток до відмови,  $T_0$ , можуть визначатися за даними таблиці 7.4.

Таблиця 7.4

Показники надійності роботи насосних станцій (за дослідженнями Ільїна Ю.О.) [11]

n	Показники надійності залежно від тривалості роботи $T_0$									
	t=1 доб.		t=3 доб.		t=7 діб.		t=14 діб.			
	P(t)	T	P(t)	T	P(t)	T	P(t)	T		
1	0,99	50	0,99	50	0,99	50	0,99	50		
2					0,98		7			
3					0,96	25	0,86	6		
4					0,98	48	0,92	11	0,73	2,5
5					0,96	25	0,86	5	0,59	1,5

Показники надійності насосними станціями I-ї категорії визначалися протягом року при подачі ними розрахункової витрати води  $q_{розр}$ , залежно від тривалості їхньої роботи між оглядами  $t$ , у добах, при виконанні ремонту однією бригадою. У табл.7.4 показані межі, у яких змінюється ймовірність безперервної подачі розрахункової витрати води із забезпеченням  $P(t)$  насосами при їхній експлуатації в «вахтовому» режимі, а також середній час  $T$  безвідмовної роботи між ремонтами. Тут прийнята інтенсивність відмов насосів  $\lambda(t)=2 \cdot 10^{-4}$  1/рік, а періодичність профілактики й відновлення насосів  $t= 1, 3, 7, 14$  діб. відповідно.

При розробці проектних рішень автоматизованих станцій збільшуються капітальні вкладення на їхнє будівництво (на установку резервних насосів, електрифікованої запірно-регулюючої арматури, систем автоматики й т.п.), яке дозволить зменшити непродуктивні втрати коштів і окупатися в результаті скорочення



чисельності обслуговуючого персоналу. Величини параметрів надійності насосів і насосних станцій наведені в табл.7.5.

Таблиця 7.5

Параметри надійності елементів насосних станцій (за даними [11])

Найменування обладнання	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-4}$ , 1/год.			Інтенсивність ремонтів, $\mu \cdot 10^{-2}$ 1/год
	$\lambda_{min}$	$\lambda_{сер}$	$\lambda_{max}$	
Насоси водопровідні				
1,5К-6; 1,5К-8/19	1	1,25	4	10
3К-9; 3К-45/30	0,9	1,5	3	4
4К-12; 4К-18	1,4	2,5	4	4
6К-8; 6К-12	0,8	2	3,5	4
1В-0,9м; 2В-12	1,8	2,4	5	4
1,5В-1.3м; 32В-12	1,8	2,4	5	4
2В-1,6м; 40В-24	1,9	2,8	5,8	4
КВН-3; КВН-4	1,8	4	7	4
1СЦВ-1,5	1,25	2,5	5	4
4НД	1,2	2,5	3,2	4
6НД	1,6	1,9	4,5	4
8НД	-	2,1	-	2
12НД; 14НД; 18НД	1,2	1,8	3,5	2
20НД	-	1,25	-	2
10Д-6; 10-Д9; 12Д-6	1,7	2,2	3,8	2
3МС-10-4; МС-10-4	-	2,2	-	4
Насоси фекальні:				
3НФ; 4НФ; 6НФ	0,8	1,8	5,6	4
ФГ 14,5/10; ФГ 16/27	0,6	1,6	3	8
ФГ 29/4; ФГ 51/58; ФГ 81/31	0,6	1,6	3	8
ФГ 144/46; ФГ 450/22,5	0,9	2,5	3	8
Трубопроводи сталеві	0,01	0,04	0,51	6
Засувки з електроприводом	0,01	0,6	1	4
Зворотні клапани	0,04	0,08	1	
Водоприймальні камери	0,01	0,03	0,1	4
Блоки управління	-	0,95	-	4
Електродвигуни	0,08	0,26	0,8	-

Визначення параметрів надійності насосних станцій може виконуватись за стандартною процедурою для технічних систем:





1. Перевірочні розрахунки насосної станції з метою визначення відповідності її нормативно-технічним вимогам з урахуванням категорії надійності;
2. Складання структурної схеми насосної станції в залежності від складу устаткування й об'язки насосів трубопровідними комунікаціями та електроустаткуванням (Рис.7.2).
3. Складання формули для розрахунку надійності насосної станції як технічної системи у відповідності зі своєю власною структурою  $P_{nc}(t)$ .
4. Визначення часу безвідмовної роботи:  $T_{cp.HC}$ .
5. Порівняння цих величин з нормативами у відповідність з категорією насосної станції. При необхідності передбачаються заходи для підвищення надійності і після корегування складу устаткування знову повторюється весь розрахунок.
6. Визначення показника якості функціонування коефіцієнта забезпеченості витрати ( $\alpha > 0,7$ ) і  $\beta$ .

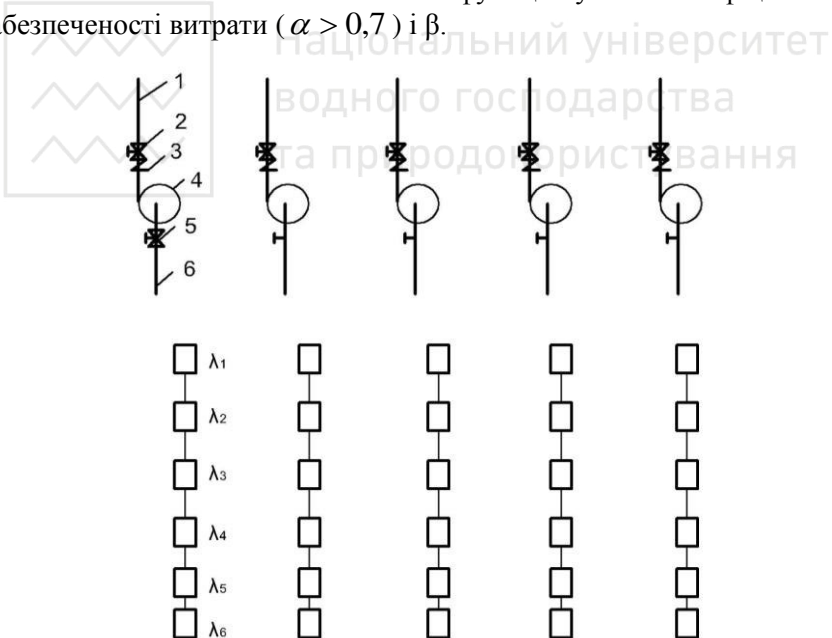


Рис. 7.2. Розрахункова схема оцінки надійності насосної станції:  
1 і 6 — напірний і всмоктуючий трубопровід; 2 і 5 — засувки; 3 — зворотний клапан; 4 — насос

**Приклад 7.1.** Визначити конструктивну надійність насосної станції II категорії надійності системи оборотного водопостачання промислового комплексу. Нехай усього на об'єкті *шість* насосних станцій різного призначення. З метою зниження витрат на експлуатацію зазначених станцій передбачається скоротити обслуговуючий персонал з **18 чол.** (за штатом) до групи з **одного майстра й чотирьох слюсарів-механіків.**

Така група за графіком (періодично 1 раз на місяць) відкриває законсервоване приміщення станції для виконання профілактичних й одночасно ремонтних робіт. Між оглядами протягом місяця станція повинна експлуатуватися за допомогою автоматизованої системи керування, і забезпечувати подачу витрати відповідно до вимог СНиП 2.04.02-84 [25], що висуваються до водопровідних споруд II-ї категорії надійності. Насосне встаткування повинне забезпечувати подачу витрати **600 м<sup>3</sup>/год.** при напорі **20 м вод. ст.**

При цих обмеженнях станція може бути обладнана **чотирма робочими й одним резервним** насосами типу 6К-8 (рис.7.2).

У якості розрахункових при оцінці надійності приймемо інтенсивність відмов насоса типу 6К-8, що дорівнює  $\lambda_4=2 \cdot 10^{-4}$  1/год, для трубопроводів – в межах станції – (внутрішньостанційних) –  $\lambda_{1,6}=10^{-7}$  1/год.; засувок –  $\lambda_{2,5}=4 \cdot 10^{-5}$  1/год.; для зворотнього клапану  $\lambda_3=10^{-5}$  1/год.

Визначемо ймовірність безвідмовної подачі розрахункової витрати води станцією протягом 1 місяця автоматизованої роботи.

За умови, що устаткування **резервоване способом заміщення**, вона складе при  $\lambda = \sum \lambda_i = 2,9 \cdot 10^{-4}$  1/год.

$$P_t = (1 + 4 \cdot \lambda \cdot t) \cdot e^{-\lambda t} = (1 + 4 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot 720) \cdot e^{-0,835} \approx 0,81.$$

Знайдене значення  $P(t)$  свідчить про те, що протягом 1 місяця можуть бути аварійні стани декількох типів.

Оцінимо їхню тривалість, щоб зіставити з вимогами норм.

**Перший аварійний стан** може виникнути, коли через несправності будуть відключені системою автоматики одночасно два насоси, а станція подає споживачеві лише частину витрати, рівну 0,75 від розрахункової  $Q_{розр}$ .

При цьому, середня тривалість перебування станції протягом місяця в цьому стані складе :

$$t_1 = \frac{16}{3 \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-3\lambda t}) - \frac{5}{\lambda} \cdot (1 - e^{-4\lambda t}) + 4 \cdot t \cdot e^{-4\lambda t} \cong 48 \text{ год.}$$

Подібний аварійний стан допускається, відповідно до вимог СНиП 2.04.02-84 [25], протягом 10 діб. При інших аварійних станах витрата станції знижується нижче припустимого рівня забезпеченості (рівного  $0,7q_{розр}$ , тому вони також можуть бути віднесені до відмовних. Середня

тривалість перебування станції протягом місяця в відмовних станах дорівнює :

$$t_{2,3} = t - \frac{16}{3\lambda} \cdot (1 - e^{-3\lambda t}) + \frac{18}{4\lambda} \cdot (1 - e^{-4\lambda t}) - 3 \cdot t \cdot e^{-4\lambda t} \cong 9 \text{ год.}$$

Знайдене значення  $t_{2,3}$  перевищує рівень, нормований для споруд II-ї категорії надійності, тому необхідно обґрунтувати додаткові заходи по підвищенню надійності роботи станції, якщо переводити її на автоматизований режим експлуатації.

Подібними заходами можуть бути обґрунтовані підбір більш надійних насосів; скорочення числа робочих агрегатів; застосування напірно-регулюючих пристроїв, що полегшують режим роботи встаткування; збільшення числа резервних агрегатів й ін.

Вибір переліку заходів повинен обґрунтовуватися техніко-економічним аналізом їхньої ефективності.

У даному прикладі обмежимося розглядом варіанта збільшення числа резервних насосів на станції до двох. При цьому ймовірність безвідмовної подачі розрахункової витрати зросте до :

$$\begin{aligned} P(t) &= \left( 1 + 4 \cdot \lambda \cdot t + \frac{(4 \cdot \lambda \cdot t)^2}{2!} \right) \cdot e^{-4\lambda t} = \\ &= \left( 1 + 4 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot 720 + 0,348 \right) \cdot e^{-0,835} \cong 0,99 \end{aligned}$$

Подібний рівень безперебійності подачі розрахункової витрати станцією гарантує зниження перерв у подачі води до тривалості, яка є нормованою СНиП 2.04.02-84 [25]. У цьому нескладно переконатися, визначивши середню тривалість перебування станції протягом місяця в відмовних станах.

Для розглянутого варіанта компонування станції вона знижується до :

$$\begin{aligned} t_{2,3} &= t - \frac{64}{3 \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-3\lambda t}) + \frac{81}{4 \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-4\lambda t}) - \\ &- 18 \cdot t \cdot e^{-4\lambda t} - 6 \cdot \lambda \cdot t^2 \cdot e^{-4\lambda t} \cong 12 \text{ год.} \end{aligned}$$

Розрахунки по надійності водопровідних споруд не обмежуються визначенням коефіцієнтів забезпеченості витрати й тривалості їхнього перебування в станах, що відповідають по забезпеченості подачі води вимогам норм.

Як додатковий показник у ряді випадків (наприклад, при змінних режимах роботи встаткування, а також при наступних технологічних розрахунках) зручно використати середнє або

знайдене з певною довірчою ймовірністю значення пропускної здатності споруд  $Q_{p, \%}(t)$  за досліджуваній період експлуатації  $t$ .

Тобто, такі показники дозволяють прогнозувати, у якому ступені показники безвідмовності, ремонтпридатності встаткування, рівень організації експлуатації можуть вплинути на відхилення пропускної здатності запроектованих споруд від розрахункового рівня.

**Приклад 7.2.** Оцінимо помісячну пропускну здатність станції попереднього прикладу при обраному складі  $n=4$ ;  $m=2$  коли вона експлуатується між профілактичними оглядами за допомогою системи автоматичного керування.

Кількість води, що буде подано станцією за місяць експлуатації за умови, що витрата  $q$ , що подається в одиницю часу, буде відповідати вимогам СНиП 2.04.02-84 (тобто, при  $q \geq 0,7 \cdot q_{розр} = 420 \text{ м}^3 / \text{год}$ ), можна визначити так:

$$Q(t) = \frac{16 \cdot q_{розр}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-3 \cdot \lambda \cdot t}) - \frac{15 \cdot q_{розр}}{\lambda} \cdot (1 - e^{-4 \cdot \lambda \cdot t}) + 13 \cdot q_{розр} \cdot t \cdot e^{-4 \cdot \lambda \cdot t} + 4 \cdot q_{розр} \cdot \lambda \cdot t^2 \cdot e^{-4 \cdot \lambda \cdot t}.$$

При  $q_{розр} = 600 \text{ м}^3 / \text{год}$ .  $\lambda = 2,9 \cdot 10^{-4} 1/\text{год}$ .

$$Q(t) = \frac{16 \cdot 600}{2,9 \cdot 10^{-4}} \cdot (1 - e^{-3 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,072}) - \frac{15 \cdot 600}{2,9 \cdot 10^{-4}} \cdot (1 - e^{-0,835}) + 13 \cdot 600 \cdot 720 \cdot e^{-0,835} + 4 \cdot 600 \cdot 150,3 \cdot e^{-0,835} \approx 430 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Подібна пропускна здатність відрізняється від необхідної (визначеної споживачем) лише на 0,5%, що підтверджує обґрунтованість рішення про корегування складу встаткування станції при переході її на режим автоматизованої експлуатації з метою скорочення обслуговуючого персоналу.

Для асинхронних електродвигунів характерні три закони розподілу відмов. Так, у період пристосування (*пусконаладжувальний період*) від нуля до  $t_1=4000$  год. можна розглядати **розподіл Вейбулла**. Рівняння імовірності безвідмовної роботи добре вивчено і має вигляд :

$$P(t) = e^{-\left(\frac{t^m}{t_0}\right)}, \quad (7.18)$$



де  $m = 0,217$ ;  $t_0 = 54,7$  год.

У період нормальної роботи – від  $t_1 = 4000$  год до  $t_2 = 20000$  год. відмови розподіляються за приблизно експоненціальному закону з

$$m = 1, \text{ тобто: } P(t) = e^{-\left(\frac{1,8 \cdot t}{10^3}\right)}, \quad (7.19)$$

при  $\lambda(t) = 1,8 \cdot 10^{-3}$  1/год

В період від  $t_1$  до  $t_4$  після напрацювання  $t_2 = 20000$  год. відмови розподіляються за нормальним законом.

У табл.7.6 показаний вплив періодичності огляду автоматичних насосних станцій ремонтною бригадою на показники надійності.

Таблиця 7.6

Формули для визначення показників надійності подачі  
розрахункової витрати води насосними станціями

Загальна кількість агрегатів	Насосні станції II категорії при числі резервних агрегатів $m=1$	
3	$P(t) = e^{-\frac{\lambda \cdot \alpha \cdot \gamma^2 \cdot t}{(1+\gamma+\gamma^2)\lambda + (\gamma+2\gamma^2)\alpha}}$	$T = \frac{(1+\gamma+\gamma^2) \cdot \lambda + (\gamma+2\gamma^2)}{\lambda \cdot \alpha \cdot \gamma^2}$
4	$P(t) = e^{-\frac{4\lambda \cdot \alpha \cdot \gamma^2 \cdot t}{(1+\gamma+4\gamma^2)\lambda + (\gamma+4\gamma^2)\alpha}}$	$T = \frac{(1+2\gamma+4\gamma^2) \cdot \lambda + (\gamma+4\gamma^2)}{\lambda \cdot \alpha \cdot \gamma^2}$

де  $\mu$  – інтенсивність ремонтів насосів ;  $\lambda$  – інтенсивність відмов насосів (агрегати в цілому з двома засувками, зворотним клапаном; за Ильїним Ю.О.[11].

Якщо увести підстановочну заміну:  $\gamma = \lambda/\mu$  та

$$\alpha = \frac{\mu}{e^{\mu \cdot t_{дон.}} - 1}, \quad (7.20)$$

отримаємо формули, які можна застосовувати для практичних розрахунків (табл.7.6), де  $t_{дон.}$  – припустима перерва в подачі води.

Слід зазначити, що ці формули складені без урахування організації ремонтних робіт.

Нехай, наприклад, встановлено кілька робочих агрегатів і один резервний. Відмови одного робочого агрегату не знижують

продуктивності станції, оскільки відразу включається в роботу резервний насос. Але, відмова ще одного (додатково) робочого агрегату вже призведе до зниження продуктивності в тому випадку, якщо ще не закінчений ремонт першого агрегату, що відмовив раніше.

Імовірність відмови одного насосного агрегату протягом часу  $t$

$$Q_1(t) = 1 - P_1(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (7.21)$$

Прийємо тривалість ремонту агрегату рівною  $\tau_p$ .

Чим більше це значення, тим більше імовірність відмови протягом цього ж часу другого агрегату. Максимально значна тривалість непрацездатного стану насосної станції станеться тоді, якщо початок ремонту другого агрегату потрапить на кінець ремонту першого агрегату (одна ремонтна бригада). Тоді час непрацездатного стану складе  $2\tau_p$ , тобто буде мати місце подвійна відмова. Імовірність відмови другого агрегату за час  $\tau_p$  складе:

$$Q_2(t \pm \tau_p) = 1 - e^{-\lambda 2\tau_p}. \quad (7.22)$$

Імовірність одночасного відмови двох агрегатів дорівнює добуткові імовірностей подій:

$$Q_{1,2}(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t \pm \tau_p) = (1 - e^{-\lambda t}) \cdot (1 - e^{-\lambda 2\tau_p}), \quad (7.23)$$

Показники ступеня  $(-\lambda \cdot t)$  і  $(-\lambda \cdot 2\tau_p)$  занадто малі, тож припустимо, що  $1 - e^{-x} \approx x$ . Отож, після перетворень (за Ю.О.Льїним) отримуємо  $Q_{1,2}(t) = 2 \cdot \lambda^2 \cdot \tau_p \cdot t$  – імовірність одночасної відмови двох насосів, де  $\lambda$  – інтенсивність відмови одного насосного агрегату

Тоді, інтенсивності відмов обладнання кожного насосного агрегату (в склад входять насос, дві засувки, зворотний клапан)

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_1 + \lambda_3. \quad (7.24)$$

Імовірність відмови обладнання одного насосного агрегату:

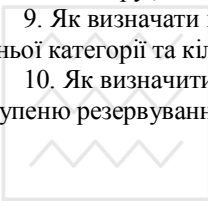
$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_1(t) \cdot P_3(t). \quad (7.25)$$

Цілком логічно припустити, що потрійна відмова вважається практично неймовірною подією.



## Контрольні запитання

1. Які способи підвищення надійності ємкісних споруд систем ВІВ?
2. Що таке «пасивний» та «активний» резервуар?
3. Як визначають показники безвідмовності для резервуарів у залежності від ступеню їх активності?
4. Як залежить об'єм резервуара у залежності від категорії системи водопостачання?
5. В чому полягає особливість визначення протипожежного об'єму резервованих ємкісних споруд?
6. Якими конструктивними і технологічними заходами підвищують надійність РЧВ і водонапірних башт?
7. Які основні види відмов насосних станцій водопостачання і водовідведення?
8. Як класифікують насосні станції залежно від ступіню зниження ними подачі і напору, а також можливої перерви у їхній роботі?
9. Як визначати показники безвідмовності насосних станцій залежно від їхньої категорії та кількості обслуговуючих бригад?
10. Як визначити конструктивну надійність насосної станції залежно від ступеню резервування основного насосного обладнання?





## 8. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ВОДООЧИСНИХ СПОРУД ТА СПОРУД ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

### 8.1. Технологічне забезпечення очищення природних вод

Споруди підготовки води для питних та виробничих потреб передбачають затримання певних домішок із природних вод, отриманих із водного джерела. При цьому концентрація, вид домішок може бути дуже різноманітним, так само як і технологія, та ступінь їхнього затримання. Концентрація домішок у вихідній воді може змінюватись на протязі року, місяця й навіть доби в дуже широких межах. Розглянемо найбільш характерні випадки очищення природних вод.

Природні води підземних та поверхневих джерел уміщують гази, різні мікроорганізми, речовини неорганічного та органічного походження. За ступенем подрібненості (дисперсності) домішки у воді поділяються на:

- *грубодисперсні* (розмір більше  $10^{-4}$  мм, навіть найменші можуть осідати в будь-якій ємкості упродовж достатньо довгого часу);
- *колоїдорозчинені* (колоїднодисперсні, розмір  $10^{-4} \dots 10^{-6}$  мм, вони не затримуються навіть при фільтруванні через пісок, фільтрувальний папір);
- *істинорозчинені* (розмір менше  $10^{-6}$  мм, вони розподілені в масі води у вигляді іонів, молекул, комплексів, являють гомогенну фазу).

Дотепер математично фазовий склад домішок ніяким чином не описано, так само, як і способи ефективного їхнього затримання. Тільки на основі експериментальних досліджень можна отримати дані з ефекту затримання таких домішок. Першочергового поліпшення при підготовці поверхневої води для питних та технічних цілей має каламутність, кольоровість, присмаки та запахи, бактеріальні забруднення.

*Каламутність* поверхневих вод коливається від 1...15 до 500...1000 мг/дм<sup>3</sup> – для рівнинних річок і до 10000 мг/дм<sup>3</sup> та більше – для гірських. Найбільш високі значення каламутності, звичайно, спостерігаються у весняну повінь, коли температура води низька й вода погано очищується від зависі. Стрибокподібне збільшення





каламутності часто відбувається після інтенсивного сніготанення та сильних дощів. У водосховищах каламутність змінюється, звичайно, у значно менших межах упродовж року. При цьому, абсолютне значення каламутності є меншим, ніж у річках.

*Кольоровість* поверхневим водам надають, звичайно, гумусові речовини, які вимиваються з навколишніх ґрунтів, потрапляють із торфових боліт, утворюються внаслідок розвитку й відмирання у водоймі рослинності й особливо зоо- та фітопланктону. Для більшості річок кольоровість коливається від 10 до 150 град. платино-кобальтової шкали (ПКШ), а для деяких невеликих річок північного та північно-західного регіону України ці показники можуть бути й вищими. У водосховищах кольоровість змінюється упродовж року, і залежить від місткості водосховища та його глибини, максимальні значення для більшості водосховищ України складають 80...105 град.

*Присмаки та запахи* з'являються у воді після штучного або природного забруднення водойми. Часто причиною виникнення запахів є масовий розвиток різноманітних грибків, водоростей (діатомових, синьо-зелених та інших), поява черепашки дрейсени, особливо в неглибоких, з малою швидкістю течій водоймах, які добре прогріваються сонцем. При відмиранні й гнитті ці організми надають воді неприємні запахи й присмаки, що потребує періодичної боротьби з ними, особливо в літній період.

В останні роки у водойми часто потрапляють погано очищені стічні води, поверхневі води з територій населених пунктів, промислових та сільськогосподарських підприємств. Таким чином, у воді джерел з'являються хімічні (погіршують органолептичні показники) і токсичні речовини.

*Феноли* потрапляють у джерела разом зі стічними водами коксохімічних та нафтопереробних підприємств, на їхню присутність указує хлорфенольний запах води після обробки хлором.

*Нафта й нафтопродукти* потрапляють у водойми разом із погано очищеними виробничими стоками, поверхневими стічними водами, від річкового транспорту. Забруднення водойм *пестицидами* відбувається завдяки їхньому змиву з полів дощами, під час сніготанення, зрошення. До них відносяться широко використовувані хлорорганічні групи пестицидів (поліхлорпілен,



гексахлоран та інші), які можуть накопичуватись в організмі людини й тварини. Вони є досить стійкими та токсичними.

*Поверхнево-активні речовини* (ПАР) уповільнюють процеси самоочищення водойм та порушують їхній кисневий режим. У великих кількостях ПАР надають воді мильно-газовий запах та гіркуватий присмак. ПАР зменшують опір організму до проникнення в нього токсичних речовин.

*Солі важких металів* потрапляють у водні джерела разом зі стоками промислових підприємств. Якщо наявність міді ( $1,0\text{мг/дм}^3$ ), цинку ( $5,0\text{мг/дм}^3$ ) та заліза ( $0,3\text{мг/дм}^3$ ) лімітується за органолептичними ознаками, то перевищення граничнодопустимої концентрації у воді миш'яку ( $0,05\text{мг/дм}^3$ ), свинцю ( $0,17\text{мг/дм}^3$ ) і деяких інших речовин небезпечно для життя людини.

Вода поверхневих джерел є сприятливим середовищем (особливо влітку) для розвитку *мікробів*, у тому числі хвороботворних. Більшість бактерій не мають кольору й прозорі. Розмножуються бактерії за 5...30 хвилин, а туберкульозна паличка – за декілька годин. Найбільшу небезпеку являють мікроорганізми, які є збудниками інфекційних захворювань, та віруси.

Іони  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  є непостійними домішками, утворюють важкорозчинені речовини, які є впливовим фактором, і визначають придатність вод для багатьох технологічних процесів на виробництві. У прісних водах іонів  $\text{Ca}^{2+}$  буває від 5 до  $90\text{мг/дм}^3$  і більше, а іонів  $\text{Mg}^{2+}$  –  $1...30\text{мг/дм}^3$ . Сума концентрацій цих катіонів обумовлює загальну жорсткість води (для природної води від 1 до 14 і вище  $\text{мг-екв/дм}^3$ ). Взагалі, кальцій потрібен для організму людини, оскільки він сприяє виводу з нього кадмію, який, у свою чергу, негативно впливає на серцево-судинну систему. Але велика жорсткість води робить її непридатною для господарсько-побутових потреб.

Вимоги споживачів до якості води можуть бути різними. Населення в межах населеного пункту використовує "Воду питну". До останнього часу існував ГОСТ 2874-82, згідно якого:

каламутність	–	не більше $1,5\text{мг/дм}^3$ ,
кольоровість	–	не більше 20 град
запах і присмак	–	менше 2 балів
колі-індекс	–	менше 3
загальна кількість бактерій	–	менше 100 шт/мл;



рН

вміст заліза

сухий залишок

Фтору

Марганцю

Сульфатів

Хлоридів

–	менше 7 мг-екв/л;
–	6,5... 8,5;
–	менше 0,3 мг/дм <sup>3</sup> ;
–	менше 1000 мг/дм <sup>3</sup> ;
–	0,7... 1,5 мг/дм <sup>3</sup> ;
–	менше 0,1 мг/дм <sup>3</sup> ;
–	менше 500мг/дм <sup>3</sup> ;
–	менше 350 мг/дм <sup>3</sup> ;

Проте, на сьогодні питна вода повинна відповідати вимогам Державних санітарних норм і правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДержСанПіН 2.2.4-171-10)[7]. Головними є мікробіологічні показники, згідно яких загальна кількість бактерій до 100шт, термостабільних кишкових паличок, патогенних мікроорганізмів – повна відсутність.

Другими за ними йдуть паразитологічні показники, відповідно до [7] передбачається їхня повна відсутність щодо патогенних кишкових найпростіших та кишкових гельмінтів.

Третіми наведено токсикологічні показники, мг/дм<sup>3</sup>, які повинні відповідати таким вимогам: алюміній – менше 0,2, барій – 0,1, миш'як – 0,01, селен – 0,01, свинець – 0,01, нікель – 0,1, нітрати – 45, фтор – 1,5; органічні компоненти, мг/дм<sup>3</sup> ( тригалометани – 0,1, хлороформ – 0,06, дібромхлорметан – 0,01, тетрахлорвуглець – 0,002, пестициди – 0,0001), інтегральні показники, мг/дм<sup>3</sup>, – окислюваність за  $KMnO_4$  – 4, загальний органічний вуглець – 3.

Четвертими наведено органолептичні показники (запах, каламутність, кольоровість, присмак, рН, сухий залишок, загальна жорсткість, сульфати, хлориди, мідь, марганець, залізо, які залишаються практично як у скасованому ГОСТі, але зі зменшенням каламутності до 0,5, сульфатів і хлоридів до 250).

П'ятими у [7] йдуть показники радіаційної безпеки води, які передбачають обмеження гранично допустимими рівнями сумарної активності альфа-випромінювачів 0,1 Бк/дм<sup>3</sup> та бета – випромінювачів 1 Бк/дм<sup>3</sup>.

Шостими за порядком ідуть показники фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води: загальна мінералізація – 100...1000 мг/дм<sup>3</sup>, загальна жорсткість – 1,5...7 мг-екв/дм<sup>3</sup>, загальна лужність – 0,5..6,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>, магній – 10...80 мг/дм<sup>3</sup>, фтор – 0,7...1,5 мг/дм<sup>3</sup>).



При знезаражуванні води хлором вміст залишкового вільного хлору у воді на виході з резервуара чистої води має бути  $0,3 \dots 0,5 \text{ мг/дм}^3$  (при тривалості контакту хлору з водою не менше 30 хв.), а вміст залишкового зв'язаного хлору не повинен перевищувати  $0,8 \dots 1,2 \text{ мг/дм}^3$  (при тривалості контакту хлору не менше 60 хв.)

Вибір технологічних схем та споруд для покращення якості поверхневих вод є найбільш складним та відповідальним у системах господарсько-питних та виробничих водопроводів. Від цього залежить їхня надійність у постійному забезпеченні потрібної якості очищеної води. Технологічну схему вибирають на основі техніко-економічних обґрунтувань, у залежності від необхідної пропускної спроможності, від якості поверхневої води, вимог до води споживачів та позитивного досвіду експлуатації споруд, які працюють в аналогічних умовах, та на основі попередньо проведених досліджень. Ураховуючи що вміст води водного джерела є нестабільним протягом року далеко не завжди вдається підібрати надійний склад споруд для очищення води.

Для підготовки води питної якості можуть бути прийняті тільки ті методи й технології, для яких отримано позитивні гігієнічні висновки. Попередній вибір основних споруд для прояснення та знебарвлення поверхневих вод здійснюється на основі їхніх найгірших кількісних показників та рекомендацій норм для проектування. Взагалі гетерогенні домішки поверхневих джерел можуть бути вилучені за допомогою методів *осадження*, тобто розділення під дією сил тяжіння, *інерції* (у тому числі відцентрових), *електростатичних*, *звукових хвиль*, *фільтрування*, тобто розділення під дією сил тиску, адгезійних сил.

У більшості випадків, поверхневі води України можна віднести до малокаламутних та кольорових вод. Найбільш надійними є реагентні способи очистки води, у яких передбачено введення у воду різних типів реагентів, коагулянтів, флокулянтів із необхідними дозами (кількістю) і різними місцями їхнього уведення, у залежності від якості вихідної води, і подальшим очищенням на прояснювачах із шаром завислого осаду, чи відстійниках та, потім, на швидких фільтрах, на контактних прояснювачах, на різних типах фільтрів. Залежно від обраних основних споруд обробки води призначають додаткові: мікрофільтри або барабанні сітки, контактні камери, змішувачі,



камери пластівцеутворення, і таке інше. Для забезпечення надійності роботи споруд передбачається певна кількість однотипних споруд, що дає можливість при зміні якості вихідної води змінювати кількість працюючих споруд. Крім того, у багатьох випадках передбачено резервування, тобто одна чи декілька споруд постійно не працює й знаходиться в ремонті або техогляді, промивці, і таке інше. Практично завжди споруди мають обвідні лінії, що дає можливість при певних технологічних умовах відключати повністю споруди. Наприклад, при високій якості вихідної води можна відключати відстійники, і подавати воду безпосередньо на швидкі фільтри, а це може дозволити не тільки спрощувати експлуатацію технологічної схеми, але й підвищувати якість і сталий вміст та обсяги надходження очищеної води, а значить і надійність системи водовідведення. На водоочисних спорудах завжди передбачають улаштування обвідної лінії, коли в найнесприятливішому випадку, можна для забезпечення надійного водопостачання подавати в господарсько-питний водопровід технічну воду з можливістю її використання в санвузлах, для поливу зелених насаджень та миття територій, для пожежогасіння й та інших невідкладних потреб, але тільки не на питні потреби.

Підземні води вважаються більш надійними для господарсько-питного водопостачання в зв'язку з тим, що мають, звичайно, стабільні витрати й більш стабільний якісний уміст, ніж у поверхневих водних джерел, що дає можливість пристосувати, і надійно забезпечувати ступінь їхньої очистки. Як правило на Україні використовують води або такі, що відповідають вимогам до питної води, або з підвищеною концентрацією заліза. При цьому основною спорудою для знезалізнення застосовують фільтри. Для забезпечення надійної роботи передбачається приймати їхню кількість не менше двох (із надмірною кратністю резервування).

Як правило на всіх водоочисних станціях господарсько-питного водопостачання передбачено знезаражування води. Найчастіше застосовують введення хлору або хлормістких реагентів. Доза (кількість) цих реагентів передбачається на найгірший випадок (на найбільше мікробіологічне забруднення), тобто на надійне знезаражування. Проте, у процесі експлуатації цю дозу можуть корегувати (наприклад, у бік зменшення) за допомогою зміни кількості дозуючого обладнання (хлораторів), або регулюванням



їхньої продуктивності. Відповідно передбачено резервування цих пристроїв. Ураховуючи те, що хлор є дуже агресивним, то все обладнання виготовляється зі стійких матеріалів (наприклад, неіржавіючої сталі, латуні й таке ін.).

## 8.2. Забезпечення технологічної надійності очищення стічних вод

Залежно від походження стічні води поділяють на **побутові** (господарсько-фекальні), **виробничі** та **атмосферні**. **Побутові** стічні води, які надходять із кухонь, туалетних кімнат, душових, лазень, пралень, їдалень тощо. Вони, звичайно, сильно забруднені від змішування з фізіологічними та господарськими відходами. **Виробничі**, які були використані в технологічних процесах, і до них потрапили забруднення (залежно від виробництва): механічні, хімічні, біологічні тощо. **Атмосферні** (внаслідок інтенсивних дощів, танення льоду, снігу). Вони забруднюються здебільшого мінеральними частинками.

Уміст забруднень побутових стічних вод передбачає наявність у них мінеральних та органічних домішок. До мінеральних належать пісок, глина, шлак, бій скла тощо. Органічні домішки можуть бути рослинного походження (залишки плодів, овочів, рослин, паперу, олії) та тваринного (фізіологічні виділення людей, тварин, залишки тканин тваринних організмів і дріжджові та плісеневі грибки, бактерії, у тому числі патогенні — черевного тифу, паразиту, дизентерії), яйця гельмінтів (глистів). За фізичним станом домішки можуть бути розчинними та нерозчинними. Нерозчинними домішками є крупна завись, суспензії, емульсії, піна, тобто частинки крупністю вище за 0,1мкм. Ступінь забруднення ними оцінюється концентрацією завислих речовин. Забруднення стічних вод органічними речовинами, які перебувають у розчиненому вигляді, оцінюється біохімічною потребою кисню (БПК), тобто такою кількістю кисню (мг/дм<sup>3</sup>), яка потрібна для окислення цих речовин аеробними бактеріями в період їхньої життєздатності. Концентрація забруднюючих речовин може бути досить різноманітною, і коливатись протягом року, доби й навіть години.



Тобто всі ці показники є випадковими величинами, але від них залежить ефективність очищення та надійність роботи споруд з очищення стічних вод.

Стічні води, які скидаються у водойми, можуть викликати зміну фізичного стану води такого джерела (прозорість, забарвлення, запах, присмак), появу плаваючих предметів та утворення осадів на дні, і зміну хімічного стану води в ньому, зменшення кількості розчиненого кисню, зміну кількості, і виду бактерій. Усе це може зробити водойму не придатною для питного, технічного водопостачання, призведе до загибелі риби, корисних мікроорганізмів. Самоочищення води у водоймі проходить у два етапи: 1) перемішування забрудненого струменя стічної води із всією масою води, 2) самоочищення, при якому проходить процес мінералізації органічних речовин та відмирання занесених бактерій.

За «Правилами охорони поверхностних вод от загрозянення сточными водами» водойми поділяються на два типи: 1) водойми питного та культурно-побутового призначення, 2) водойми рибогосподарського призначення. Кожний з цих типів ще поділяється на два види і для кожного з них встановлена гранична межа забруднення по певним показникам. Потрібна ступінь очистки стічних вод повинна відповідати виразу

$$C_c \cdot q + C_p \cdot a \cdot Q < (a \cdot Q + q) C_{np}, \quad (8.1)$$

де  $C_c$  – концентрація забруднень в стічних водах;  $C_p$  – концентрація цього забруднювача в воді водойми;  $C_{np}$  – гранично можливе забруднення води водойми за цим забруднювачем;  $Q$  – витрати води в водоймі;  $q$  – витрати стічних вод.

Приток *атмосферних вод*, звичайно, має періодичний характер й одразу у великій кількості. Його відведення відбувається за допомогою каналів, лотків, або природніми кюветами і канавами. Для забезпечення надійності роботи каналізаційних очисних споруд атмосферні води повинні збиратись в спеціально передбачені накопичувачі, а потім невеликими порціями подаватись на очищення, таким чином, щоб не змінювати в значній мірі як витрати, так і концентрацію домішок. *Виробничі стічні води* можуть відводитись спільно з побутовими, якщо вони не порушують роботу



мереж і споруд, не мають речовин, які засмічують труби мережі, не руйнують труби, не вміщують шкідливі речовини в концентраціях, які порушують роботу очисних споруд, не вміщують спалимі домішки, або розчинні речовини, які можуть утворювати вибухонебезпечні, або токсичні гази. При невиконанні цих вимог виробничі стічні води повинні відводитись самостійно. Особливу шкоду каналізаційним очисним спорудам приносять залпові скиди висококонцентрованих виробничих вод. Тому для забезпечення надійності роботи споруд слід дуже чітко слідкувати за скидом виробничих вод.

Очищують **побутові стічні води** за допомогою механічних та біохімічних способів, а бактерії знищують знезаражуванням (дезінфекцією). Механічне очищення проводиться на спеціальних *решітках, піскоуловлювачах, відстійниках*. Для біологічного очищення води застосовують біофільтри або аеротенки. Осад, який осів у відстійниках, має неприємний запах, небезпечний у санітарному відношенні, погано підсихає. Тому його зброджують у двоярусних відстійниках, метантенках та інших спорудах.

Заброджений осад отримує однорідну структуру, при підсушуванні на мулових майданчиках віддає вологу. Він містить азот, фосфор, калій і може бути використаний (в певних умовах) у якості добрива.

**Промбутові стічні води** після очищення й **дощові води**, як правило, скидають у відкриті водоймища і водотоки. Скидання цих вод здійснюється через спеціальні споруди – *випуски*. Очищені та знезаражені стічні води можна скидати у водойми за допомогою берегових та руслових випусків, які розміщуються в місцях значної турбулентності потоку – звуженнях, притоках, порогах річок тощо. При скиданні стічних вод передбачається їх додаткове самоочищення внаслідок розчинення водою водоєм та насиченням киснем повітря. Випуски стічних вод відіграють важливу роль і у забезпеченні надійної роботи системи водовідведення, особливо у разі виникнення аварійних ситуацій.

Випуски повинні відповідати наступним вимогам:

- ✚ надійність конструкції і висока стійкість в умовах повині і льодоставах;
- ✚ забезпечення ефективного перемішування стічних вод з водою водоймища або водотоки.





На стійкість випусків впливають швидкість потоків стічних вод і води водоймища, а також його конструктивне рішення і сполучення з береговою смугою.

Змішування стічних вод з водою водоймища характеризується кратністю розбавлення  $m$

$$m = \frac{Q + q}{Q}, \quad (8.2)$$

де  $Q$  — витрата води у водоймищі (розрахунковий стік річки),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $q$  — витрата стічних вод, що скидаються через випуск,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При визначенні кратності розбавлення для водотоків слід враховувати, що не вся витрата водотоки бере участь в змішувні, для чого у формулу (8.2) вводиться поправковий коефіцієнт змішування  $\gamma$ .

Тоді формула приймає вигляд

$$m = \frac{\gamma \cdot Q + q}{Q}. \quad (8.3)$$

Місця влаштування випусків потрібно вибирати, виходячи з можливостей максимального змішування. На річках це місця з підвищеною турбулентністю потоку, з високими швидкостями й звивистим руслом, де унаслідок поперечної циркуляції потоку ефект змішення зростає. При скиданні очищених стічних вод у моря й водосховища необхідно передбачати влаштування глибоководних випусків. Конструкцію випуску слід також вибирати відповідно до вимог судноплавства, режиму, рівня води у водоймищі, хвильових дій, а також інженерно-геологічних умов і руслових деформацій.

Для забезпечення надійності роботи споруд їхню кількість слід передбачати з урахуванням резерву, для забезпечення можливості їхнього періодичного відключення. Крім того, передбачають обладнання для регулювання подачі кисню, і зворотнього активного мулу, і реагентів. Такі пристрої мають бути обов'язково резервованими. Усі споруди повинні бути розраховані на певну, розрахункову продуктивність і концентрацію забруднюючих речовин, але дозволяється, в окремих випадках, скидати повністю неочищені стічні води (або частково) через вище зазначені аварійні випуски.

Загалом, усі очисні споруди, як для підготовки води для господарсько-питних потреб так і для очистки стічних вод, за своїм



призначенням повинні виконувати свою основну функцію з очищення води до необхідного ступеню якості; 2) мати достатню стійкість, тобто під час роботи окремі елементи повинні витримувати певні значні навантаження, 3) бути досить простими в експлуатації, 4) рекомендується відповідними проектними заходами зменшувати вартість будівництва та експлуатації основних споруд.

Можливість виконати вище наведені вимоги до споруд очищення природних і стічних вод забезпечується високою їхньою надійністю, яка відображає властивість системи виконувати свої функції, зберігаючи при цьому за часом установлені експлуатаційні показники. Перший пункт можна віднести до *технологічної надійності* роботи споруд, а інші – до *конструктивної надійності*.

**Технологічна надійність** роботи споруд обробки води забезпечується виконанням проектних, будівельних і експлуатаційних заходів. Проектні заходи передбачають вибір оптимальної та гнучкої схеми очистки, досконалих споруд та окремих їхніх елементів, обладнання, і використання вдосконалених методів розрахунку, що дає можливість призначити достатні розміри споруд, використання сучасних, більш дешевих матеріалів для зведення споруд та обладнання. Загалом, мета зробити очисні станції більш дешевими, як у процесі спорудження, так і при експлуатації, призводить, як правило, до зниження надійності окремих споруд. Проте, у більшості випадків, питання про стовідсоткову надійність і не ставиться перед очисними станціями.

Будівельні заходи передбачають використання передбачених проектом матеріалів, суворе дотримання технології будівельно-монтажних робіт, які передбачені проектом для кожного елемента очисної станції, підвищення культури виробництва. Дуже часто виникають обставини, коли будівельники відхиляються від визначених за проектом розмірів. Найчастіше помилки виникають у забезпеченні необхідних розмірів окремих технологічних отворів, місць підключення й спряження труб, або не вірно розташовують їх у плані, або ж по висоті, не забезпечують достатню відстань між ними, що при експлуатації викликає суттєві порушення технологічних режимів і, відповідно, порушується якість очистки. Недодержання технології будівництва в більшості випадків призводить до значного зменшення герметичності ємкісних споруд

(резервуарів, накопичувачів, відстійників, аеротенків, фільтрів тощо), відбувається значна фільтрація води за межі споруди в процесі експлуатації, а це взагалі може викликати нештатну ситуацію, або ж відмову при експлуатації споруди.

Експлуатаційні заходи базуються на підготовці кваліфікованих інженерних кадрів та кадрів із технічного обслуговування, розробці правил технічної експлуатації з урахуванням виникнення всіх можливих ситуацій у роботі споруд, при постійному моніторингу за їхньою роботою та якістю вхідної води (яка надходить для очищення) і тої, що виходить (на виході зі споруд). Усе це повинно відбуватися при суворому дотриманні правил технічної експлуатації з можливістю технічно грамотної, швидкої зміни режиму роботи в разі змінюваності штатного режиму й, у першу чергу, при зміні якісних показників вихідної води, і використання прогресивних систем ремонтів та сучасного експлуатаційного обладнання.

### 8.3. Обґрунтування надійності споруд очищення води

Питання надійності водоочисних споруд ще недостатньо вивчені й обґрунтовані на сучасному розвитку систем водовідведення. Із врахуванням надійності середні витрати води, які подаються на очисні споруди

$$Q = \frac{\mu}{\mu + \lambda} dt, \quad (8.4)$$

де  $Q$  – витрати води, які подаються на очисні споруди, м<sup>3</sup>/доб;  $t$  – розрахунковий період оцінки роботи споруд (як правило, приймається рівним одному року);  $\lambda$  і  $\mu$  – відповідно інтенсивність ремонтів і відмов всього комплексу очисних споруд.

Числові значення інтенсивностей ремонтів і відмов окремих елементів споруд та деяких споруд наведені в табл. 8.1.

Визначення надійності всієї водоочисної станції загалом, або станції обробки стічних вод проводиться за схемою, яка описана для інших споруд у попередніх розділах. Тобто, спочатку визначаються показники надійності окремих елементів споруд, або блоку, що конструктивно і структурно включає кілька однотипних споруд (розподільна система, фільтруюче завантаження, подавальні



трубопроводи, блок відстійників, блок змішувачів, блок аеротенків тощо), а потім уже окремою споруди або всієї очисної станції в цілому.

Таблиця 8.1

Значення інтенсивностей ремонтів і відмов

№ з/п	Назва окремих елементів та споруд	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^4$ , 1/год., при $\delta=0,95$			Інтенсивність ремонтів $\mu \cdot 10^2$ , 1/год.
		$\lambda_{min}$	$\lambda_{cp}$	$\lambda_{max}$	
1.	Коробки безнапірних відстійників, контактних прояснювачів, фільтрів.	0,02	0,05	0,15	0,5-1
2	Напірні фільтри	0,5	0,1	0,2	1...2
3	Мікрофільтри та барабанні фільтри	0,8	1,6	2,0	2
4	Дренаж фільтрів:				
	* трубочастий	0,10	0,25	0,40	0,5-1
	* ковпачковий	0,15	0,20	0,50	0,5-1
	* полімербетонний	0,5	0,15	0,30	0,5-1
5.	Бактерицидні установки				
	* ОВ-1П	2,0	2,5	4,0	10
	* ОВ-1П-РКС	2,0	2,0	4	10
6.	Хлоратори АХВ 1000	0,20	0,80	1,25	10
7.	Контрольно-вимірювальні пристрої	-	1,25	-	10
8.	Труби сталеві у середині приміщення	0,01	0,04	0,13	6
9.	Засувки з електродвигуном	0,10	0,30	0,80	2,0

Для прикладу розглянемо оцінку конструктивної надійності фільтрів (хоча всі наступні викладки можуть стосуватись будь-якої споруди водоочисної станції й станції очистки стічних вод).



Усі фільтри на станції можна розглядати, як просту резервовану систему з відновлювальних елементів. При відмові (неробочий стан) одного з фільтрів, на період його відновлення, подача всієї води здійснюється на інші робочі фільтри. На кожній станції, у залежності від загальної кількості робочих фільтрів, може знаходитись в стані поточного ремонту один-два фільтри. Однак, може виникати відмова інших фільтрів за незалежними від обслуговуючого персоналу причинами. Відмова двох або більше фільтрів на станції із чотирма, або п'ятьма фільтрами в достатній мірі можлива.

Відповідно до основних положень теорії надійності систем водопостачання та водовідведення, значення надійності, або ймовірність безвідмовної роботи фільтрувальної станції можливо визначити з виразу

$$P = \sum_{i=1}^n C_n^i \cdot P_1^i \cdot (1 - P_1)^{n-i} . \quad (8.5)$$

де  $n$  – загальна кількість фільтрів,  $i$  – кількість фільтрів, які знаходяться на відновленні,  $C$  – число сполучень,  $P_1$  – надійність одного фільтра.

Розрахунки за формулою (8.5) показують, що  $P$  на станції з чотирма фільтрами при відмові одного складе  $P_{n-1}=0,999942$ , двох –  $P_{n-2}=0,997496$ , трьох –  $P_{n-3}=0,9595458$ , а на станції з п'ятьма фільтрами при відмові одного –  $P_{n-1}=0,9999948$ , двох –  $P_{n-2}=0,999728$ , трьох –  $P_{n-3}=0,994149$  тощо (надійність одного фільтра прийнята  $P_1=0,9125$ ).

Таким чином, зменшення кількості фільтрів на станції та збільшення кількості фільтрів із відмовами зменшує її надійність. Суттєвий вплив на підрахунок імовірності безвідмовної роботи виражає значення надійності одного фільтра –  $P_1$ .

Кожний фільтр можна вважати нерезервованою системою, у якій усі елементи основні, й вихід одного з них викличе припинення функціонування всієї системи.

Для такої системи

$$P_1 = \prod_{i=1}^n p_i . \quad (8.6)$$

Імовірність відмов усієї системи



$$P_{\text{сист.}} = 1 - P_1 = 1 - \prod_{i=1}^n p_i, \quad (8.7)$$

де  $p_i$  – надійність роботи кожного елемента.

З достатнім ступенем точності надійність роботи одного елемента оцінюють  $p_i = 0,99$ . Тоді при кількості однотипових елементів  $n$  надійність  $P_1$  відповідно дорівнює: при 2-х –  $P_1 = 0,9800$ ; при 3-х –  $P_1 = 0,9702$ ; при 4-х –  $P_1 = 0,9606$ ; при 5-ти –  $P_1 = 0,9510$ ; при 6-ти –  $P_1 = 0,9414$ ; при 7-ми –  $P_1 = 0,9320$ ; при 8-и –  $P_1 = 0,9227$ ; при 9-ти –  $P_1 = 0,9125$ .

Тобто зі збільшенням кількості елементів надійність системи знижується. Для фільтрів можливо виділити наступні основні розрахункові елементи: 1) фільтруюча засипка, 2) підтримуючі шари, 3) промивні пристрої, 4) верхня розподільна система, 5) нижня розподільна система, 6) засувка вихідної води, 7) засувка фільтрованої води, 8) засувка промивної води, 9) засувка стічної води.

Усі інші, не вказані деталі фільтрів, цілком можливо відносити до будь-якого з вище перелічених елементів. Так, трубопроводи, які обслуговують роботу фільтрів відносять до відповідних засувок, промивні насоси та місткості відносяться до промивних пристроїв.

Таке групування елементів фільтра з точки зору математичного очікування випадкової величини в загальному випадку дозволяє вважати їх однотиповими. Середнє напрацювання на відмову засувки менша, ніж для фільтруючої засипки, але й час відновлення засувки менший. Крім того, усі відмови необхідно розглядати поступовими, а конструкційні, виробничі й експлуатаційні відмови не враховувати, тому що вони являють собою порушення будь-яких правил, норм і можуть бути віднесені тільки до окремих об'єктів.

Проміжні та раптові відмови елементів, які були перелічені вище, обумовлені такими основними причинами: фільтруюче завантаження характеризується поступовим стиранням, подрібненням, виносом, в наслідок чого погіршується утримуюча здатність, з'являються брудові грудки, непромиті зони. Коли ці явища досягають певної межі, спостерігаються суттєві зміни параметрів роботи фільтрів, тобто настає відмова. Підтримуючі шари є проміжною ланкою між фільтруючою засипкою й нижньою розподільною системою.



Під час промивки може виникати поступове зміщення підтримуючих шарів, зникає їхня захисна роль, фільтруюча засипка починає потрапляти в розподільну систему, забруднює її, і порушує процес промивки. Фільтр виходить із нормальних умов роботи за рахунок відмови цього елемента. Тривалість напрацювання на відмову цих двох елементів обчислюється місяцями й роками. Відновлення фільтруючої засипки й підтримуючих шарів буває тривалим, оскільки необхідно вилучати всю засипку та підтримуючі шари, ремонтувати розподільну систему, а потім знову ретельно завантажувати фільтр.

У залежності від розмірів фільтра, ступеню механізації виконання робіт, тривалість відновлення може бути від кількох діб до декількох тижнів. Верхня й нижня розподільна системи входять у стан відмови за рахунок корозії отворів, їхнього заростання та закупорки частинками фільтруючої засипки, і механічних ушкоджень. Процес входження у відмову довгий і особливо для нижньої системи оцінюється тими самими термінами напрацювання і показниками безвідмовності та ремонтпридатності, що й попередні. Усі засувки на станціях, звичайно, рекомендовано електрифікувати, а їхню роботу автоматизувати. Напрацювання на відмову їхніх механічних та електричних частин оцінюється тисячами годин, а відновлення десятками годин. Таким чином, коефіцієнт готовності,  $K_2$ , який визначається відношенням середнього напрацювання на відмову до сумарного часу напрацювання та відновлення, для всіх перелічених елементів приблизно на однаковому рівні.

У фільтрах з усіма цими елементами надійність роботи дорівнює  $P=0,9125$ . Відмова від підтримуючих шарів і перехід на розподільні системи з малими отворами (ковпачки замість звичайної перфорації труб, пористий бетон) зменшує кількість елементів на одиницю підвищуючи надійність до  $P=0,9227$ . У пінополістирольних фільтрах із висхідним потоком елементів усього п'ять (фільтруюча засипка, верхня й нижня розподільна система, засувки вихідної та стічної вод), а надійність роботи підвищується до  $P=0,9510$ . У той же час, введення додаткових елементів, таких як трубопровід, або засувка відведення першого фільтрату, які є в контактних прояснювачах, і були раніше в швидких фільтрах, додаткових дренажних систем, збільшує



загальну кількість елементів до 11 і знижує ступінь надійності споруди до  $P=0,8953$ . Тому, використання кварцових фільтрів із фільтруванням знизу до гори в напрямку зменшення крупності зерен є доцільним за технологічними показниками, у той же час такий спосіб фільтрування знижує їхню конструктивну надійність. Тобто, висока надійність не завжди адекватно відповідає оптимальному технологічному рішенню, і тому в кожному конкретному випадку необхідно вирішувати, якому з показників слід віддавати перевагу при врахуванні місцевих умов.

При необхідності детального аналізу будь-якого розрахункового елемента, ступінь надійності роботи фільтра розраховується з урахуванням різнотипності елементів у складі об'єкта. У такому випадку можна прийняти

$$p_i = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (8.8)$$

де  $t$  – тривалість відмов,  $\lambda$  – інтенсивність відмов або середня кількість відмов на одиницю часу.

Для визначення  $\lambda$  необхідно на основі статистичних даних визначити час  $t$  між відмовами, що дорівнює частці від ділення фактичного часу роботи на сумарну кількість відмов за цей час. Наприклад, коли вивчаються нові фільтруючі засипки, ступінь надійності фільтра може орієнтовно оцінюватись наступним чином: у разі заміни кварцового піску на неподібнений керамзит, усі останні розрахункові елементи приймаються однотиповими, які мають повну аналогію. Слід зкорегувати тільки надійність роботи засипки. На очисних спорудах щорічно потрібно засипати в кварцові фільтри до 10 відсотків нової засипки, а на протязі 10 років обновляється, практично уся засипка, а «термін життя» засипки  $t=10$  років. Відповідно до правил експлуатації [22] один раз у півріччя необхідно перевіряти товщину фільтруючої засипки, і при необхідності підсипати певну кількість засипки додатково. Таким чином, можна прийняти  $\lambda=0,5$  1/рік. При вірно запроєктованих дренажних системах і необхідній експлуатації споруд винесення зерен засипки ймовірно буде за рахунок стирання та подрібнення. За експериментальними даними для кварцового піску стираємість дорівнює 0,23%, подрібнення – 2,85%, всього 3,08%, для не подрібненого керамзиту відповідно – 0,17%, 0,36%, 0,53%. відповідно У зв'язку з тим, що стираємість та подрібнення для





керамзиту менші, то значення інтенсивності відмов  $\lambda$  для нього буде приймати значення  $\lambda = 0,5 \frac{3,08}{0,53} = 2,9$  1/рік.

Визначена за формулою (8.6) надійність засипки із кварцового піску  $P=0,9933$ , а керамзиту  $P=0,9999$ . Аналогічні розрахунки можливо зробити й для фільтрів із пінополістирольною засипкою, для яких передбачена ще й інша конструкція. Стираємість пінополістиролу дорівнює 0,08%, подрібнення – 0,01%, всього 0,09%, а ймовірність безвідмовної роботи  $P=0,999999$ . При розрахунках за формулою (8.5) надійність із вісьма розрахунковими елементами для кварцових і керамзитових фільтрів та п'ятьма для пінополістирольних дорівнює для кварцових  $P=0,9257$ , керамзитових –  $P=0,9319$ , пінополістирольних -  $P=0,9608$ . Тобто, надійність пінополістирольних фільтрів із висхідним потоком найвища. Крім того, вони не потребують промивних насосів і ємкостей, що ще більше підвищує їх надійність і спрощує експлуатацію.

Таким чином, при забезпеченні необхідного ступеню очистки води перевагу слід віддавати спорудам із найменшою кількістю основних робочих елементів.

**Приклад 8.1.** Визначити частоту відмов та інтенсивність відмов ковпачків за інтервал  $\Delta t=120\dots240$  годин. Під час випробування ковпачкової розподільної системи, яка має  $N_0=100$  ковпачків за перші 120 годин відмовило  $n=9$  ковпачків, за інтервал часу  $\Delta t=120\dots240$  годин відмовило ще 10 ковпачків

Частота відмов

$$a(120-240) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_0} = \frac{10}{120 \cdot 100} = 8,3 \cdot 10^{-4} 1/год.$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(120-240) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_{cp}} = \frac{10}{120(91+81)/2} = 9,6 \cdot 10^{-4} 1/год.$$

**Приклад 8.2.** Під час випробування  $N_0=100$  ковпачків за перші 120 годин відмовило  $n=9$  ковпачків, за інтервал часу 120...240 годин відмовило ще 10 ковпачків, а за інтервал 240...360 годин – ще 10 ковпачків. Визначити ймовірність безвідмовної роботи за 120, 240 і 360 годин, середню частоту та інтенсивність відмов ковпачків 360 годин.

Ймовірність безвідмовної роботи



$$P(120) = 1 - \frac{n(t)}{N_0} = 1 - \frac{9}{100} = 0,91.$$

$$P(240) = 1 - \frac{n(t)}{N_0} = 1 - \frac{19}{100} = 0,81.$$

$$P(360) = 1 - \frac{n(t)}{N_0} = 1 - \frac{29}{100} = 0,71.$$

Частота відмов

$$a(360) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_0} = \frac{10}{120 \cdot 100} = 8,3 \cdot 10^{-4} 1/год.$$

$$\text{Інтенсивність відмов } \lambda(360) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{8,3 \cdot 10^{-4}}{0,71} = 11,7 \cdot 10^{-4} 1/год.$$

**Приклад 8.3.** Напірний фільтр можна поділити на п'ять елементів – нижня розподільна система, засипка, верхня розподільна система, подавальні трубопроводи, відвідні трубопроводи. Відмова будь-якого з елементів призводить до відмови всього фільтра. При обстеженні встановлено, що перший елемент відмовив два рази на протязі 360 годин роботи, другий – три рази на протязі 500 годин, третій та четвертий – один раз на протязі 280 годин, п'ятий – чотири рази на протязі 150 годин. Визначити напрацювання на відмову, якщо є відповідність експоненціального закону розподілу.

Інтенсивність відмов елементів

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{t_1} = \frac{2}{360} = 0,55 \cdot 10^{-2} 1/год.$$

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{t_2} = \frac{3}{500} = 0,60 \cdot 10^{-2} 1/год.$$

$$\lambda_3 = \frac{n_3}{t_3} = \frac{1}{280} = 0,35 \cdot 10^{-2} 1/год.$$

$$\lambda_4 = \frac{n_4}{t_4} = \frac{1}{280} = 0,35 \cdot 10^{-2} 1/год.$$

$$\lambda_5 = \frac{n_5}{t_5} = \frac{4}{150} = 2,66 \cdot 10^{-2} 1/год.$$

Інтенсивність відмови фільтра

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 =$$

$$(0,55 + 0,66 + 0,35 + 0,35 + 2,66) \cdot 10^{-2} = 4,51 \cdot 10^{-2} 1/год$$



## Середнє напрацювання на відмову

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{4,51 \cdot 10^{-2}} = 22,1 \text{ год.}$$

**Приклад 8.4.** Зміна пропускної здатності фільтра підпорядкована експоненціальному закону з параметрами  $\lambda = 1,25 \cdot 10^{-4}$  1/год. Визначити ймовірність безвідмовної роботи фільтра, частоту відмов та середнє напрацювання до першої відмови за 120 годин. Під час роботи фільтр не промивався.

Ймовірність безвідмовної роботи фільтра

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-1,25 \cdot 10^{-4} \cdot 120} = 0,98.$$

Частота

$$\text{відмов } a(t) = \lambda(t) \cdot P(t) = 1,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,98 = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Напрацювання до першої відмови

$$T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1,25 \cdot 10^{-4}} = 8000 \text{ год.}$$

**Приклад 8.5.** Розподільна система біофільтра має 100 ділянок. Тривалість експлуатації - 10 років та вона підпорядкована експоненціальному закону з параметром  $\lambda = 0,25 \cdot 10^{-4}$  1/год. Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи мережі за 10 років, частоту відмов та кількість відмов при умові, що вони прямо пропорційні кількості ділянок.

Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 108760} = 0,99.$$

Частота відмов

$$a(t) = \lambda(t) \cdot P(t) = 0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,99 = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Кількість відмов

$$n(t) = N_0 \cdot Q(t) = 100 \cdot (1 - 0,99) = 1.$$

**Приклад 8.7.** При випробуванні фільтра було зареєстровано 10 відмов. До початку випробувань фільтр пропрацював 200 годин. Загальна наробка складала - 2000 годин. Визначити середнє напрацювання на відмову.

Тривалість випробувань

$$t = t_1 - t_2 = 2000 - 200 = 1800 \text{ год}$$

Середнє напрацювання на відмову



$$t_{cp.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = 180 \text{ год.}$$

**Приклад 8.8.** При спостереженні роботи трьох аеротенків було зареєстровано на першому аеротенку – 10 відмов, другому – 12, третьому – 9. Напрацювання першого дорівнює – 200 год, другого – 240 год, третього – 180 год. Визначити середнє напрацювання на на відмову аеротенків.

Загальне напрацювання аеротенків

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_j} t_{ij} = 200 + 240 + 180 = 620 \text{ год.}$$

Загальна кількість відмов

$$n_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N n_j = 10 + 12 + 9 = 31$$

Среднє напрацювання на відмову

$$t_{cp.} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j} = \frac{620}{31} = 20 \text{ год.}$$



**Приклад 8.9.** Для випробування в розподільну систему біофільтра встановили 100 однакових розбризкувачів. Конструкція розбризкувачів дозволяла проводити їх прочищення. Після прочищення розбризкувачі можна повертати в роботу. Під час випробувань встановлено, що в перші 100 годин вийшло із ладу 10 розбризкувачів, за період 100...200 годин – 12, за період 200...300 годин – 9. Визначити ймовірність безвідмовної роботи за інтервали: 0...100, 100...200 і 200...300 годин.

Так як розбризкувачі після ремонту повертаються в роботу то система відновлювана.

Ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P_1(t) = 1 - \frac{n_1(t)}{N_0} = 1 - \frac{10}{100} = 0,9.$$

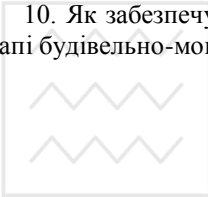
$$P_2(t) = 1 - \frac{n_2(t)}{N_0} = 1 - \frac{12}{100} = 0,88.$$

$$P_3(t) = 1 - \frac{n_3(t)}{N_0} = 1 - \frac{9}{100} = 0,91.$$



### Контрольні запитання

1. Яку якість води повинні надійно забезпечити споруди станцій водоочистки госп-питного призначення?
2. Які показники якості вхідної води поверхневих джерел на вході водоочистних станцій?
3. В чому особливості вхідної води із підземних джерел?
4. Якими способами забезпечується технологічна надійність очищення природних вод?
5. Якими способами забезпечується технологічна надійність очищення стічних вод?
6. Що таке гранично припустима концентрація забруднень, та як вона впливає на надійність станції очищення стічних вод?
7. Вплив конструкції та місця розміщення випусків на забезпечення надійного самоочищення стічних вод у вододжерелах?
8. Що таке однотипні конструктивні елементи очисної споруди?
9. Як практично визначити конструктивну надійність очисної споруди в умовах її резервування?
10. Як забезпечується необхідний рівень надійності очисних споруд на етапі будівельно-монтажних робіт?





## Використана література

1. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения. М. : Стройиздат, 1984. - 231 с.
2. ВБН46/33-2.5-5-96 Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі і споруди. Норми проектування.- К.,1996.-152 с.
3. ГОСТ 27.410-87 Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность.
4. 203-83 Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности.
5. ГОСТ 2761-84 Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения.-М.:Стройиздат,1985.-12 с.
6. ДБН В.2.5:2007 Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів.СНББ,Науково-технічний супровід.
7. ДБН В.1.2-14: 2009 Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.
8. ДСанПіН 2.2.4-171-10 Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною.
9. ДСТУ 2470-94 Надійність техніки. Системи технологічні. Терміни та визначення
10. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
11. ДСТУ 2862-94 Методи розрахунків показників надійності.
12. Ильин Ю.А.Расчет надежности подачи воды.-М.: Стройиздат,1987.-320 с.
13. Косінов В.П. Вдосконалення водопровідних мереж з урахуванням мінливості критеріїв надійності та економічності в процесі експлуатації. Автореферат дис.на здобуття наук. ступеня кан.техн.наук.Рівне: НУВГП,2005.-20 с.
14. Косінов В.П. Прогнозування змінюваності параметра інтенсивності відмов водопровідних ліній мережі і водоводів з урахуванням термінів їх експлуатації та складності відновлення ушкоджених елементів// Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво . – УДУВГП, Рівне, 2003. – с.83-89.
15. Математические методы решения задач надежности водопроводно-канализационных систем. Раздел 1. Основы надежности инженерных систем. (Конспект лекций для студентов 3-5 курсов дневной и заочной форм обучения, экстернов и иностранных студентов специальности 7.092601 «Водоснабжение и водоотведение»)/Душкин С.С., Солодовник М.В., Благодарная Г.И., Булгаков О.В.-Харьков: ХНАГХ,2006.-56 с.



16. Методика выбора показателей для оценки надежности сложных технических систем.-М.: Издательство стандартов СМ СССР, 1977.-43 с.
17. Методические указания к курсовому проекту и практическим занятиям по курсу «Математические методы решения задач надежности водопроводно-канализационных систем» (для студентов 3-5 курсов дневной и заочной форм обучения, экстернов и иностранных студентов специальности 7.092601 «Водоснабжение и водоотведение» /С.С.Душкин, М.В.Солодовник, Г.И.Благодарная, О.В.Булгакова.- Харьков: ХНАГХ, 2005.-24 с.
18. РД50-690-89 RUНадежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным (Взамен ГОСТ27.201-81, ГОСТ 27.502-83, ГОСТ 27.503-81, ГОСТ 27.504-83).
19. Надежность и эффективность в технике. - Т.2. Математические методы в теории надежности и эффективности // Под ред. Б.В.Гнеденко. - М.: Машиностроение, 1987. -280 с.
20. Найманов А.Я., Насонкина Н.Г., Маслак В.Н., Зотов Н.И. Основы надежности инженерных систем коммунального хозяйства.-Донецк: ИЕП НАН Украины,2001.-152 с.
21. Науменко И.И. Надежность сооружений гидромелиоративных систем. Учеб.пособие.-К.:Выща шк.,19990.-239 с.
22. Орлов В.О.Водопостачання та водовідведення: підручник /В.О.Орлов, Я.А.Тугай, А.М.Орлова.- К.: Знання, 2011.- 539 с.
23. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та каналізації сільських населених пунктів України. ВНД33-3.4-01-2001.К.:Держводгосп України,2000.-141 с.
24. СанПиН 4630-88 Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения (Санітарні правила і норми охорони поверхневих вод від забруднення).
25. СНИП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий.-М.: Стройиздат, 1986.- 56 с.
26. СНИП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Нормы проектирования.- М.: Стройиздат, 1985.-134 с.
27. СНИП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.-М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
28. СНИП 3.05.4-85.Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации.М.,1985.- 48 с
29. Ткачук О.А.Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів.-Рівне: НУВГП,2008.-301 с.
30. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник/ Под ред. В.Д.Дмитриева, Б.Г.Мишукова.- 3-е изд. переработ. и допол.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.-383 с.



Додаток 1

Процентні точки розподілу Стьюдента  $t_{p,(n-2)}$

$P$ $n-2$	5%	0,1%	$P$ $n-2$	5%	0,1%
1	6,3138	318,3088	28	1,7011	3,4082
2	2,9200	22,3271	29	1,6991	3,3962
3	2,3534	10,2145	30	1,6973	3,3852
4	2,1318	7,1732	32	1,6939	3,3653
5	2,0150	5,8934	34	1,6909	3,3479
6	1,9432	5,2076	36	1,6883	3,3326
7	1,8946	4,7853	38	1,6860	3,3190
8	1,8595	4,5008	40	1,6839	3,3069
9	1,8331	4,2968	42	1,6820	3,2960
10	1,8125	4,1437	44	1,6802	3,2861
11	1,7959	4,0247	46	1,6787	3,2771
12	1,7823	3,9296	48	1,6772	3,2689
13	1,7709	3,8520	50	1,6759	3,2614
14	1,7613	3,7874	55	1,6730	3,2561
15	1,7530	3,7328	60	1,6706	3,2317
16	1,7459	3,6862	65	1,6686	3,2204
17	1,7396	3,6458	70	1,6669	3,2108
18	1,7341	3,6105	80	1,6641	3,1953
19	1,7291	3,5794	90	1,6620	3,1833
20	1,7247	3,5518	100	1,6602	3,1737
21	1,7207	3,5272	120	1,6577	3,1595
22	1,7171	3,5050	150	1,6551	3,1455
23	1,7139	3,4850	200	1,6525	3,1315
24	1,7109	3,4668	250	1,6510	3,1232
25	1,7081	3,4502	300	1,6499	3,1176
26	1,7056	3,435	400	1,6487	3,1107
27	1,7033	3,421	500	1,6479	3,1066

Додаток 2

Квантілі розподілу максимального відносного відхилення  $\tau_{1-p}$

Обсяг виборки, $n$	Рівні значущості, $P$	
	0,05	0,01
3	1,41	1,41
4	1,69	1,72
5	1,87	1,96



6	2,0	2,13
7	2,09	2,27
8	2,17	2,37
9	2,24	2,46
10	2,29	2,54
11	2,34	2,61
12	2,39	2,66
13	2,43	2,71
14	2,46	2,76
15	2,49	2,8
16	2,52	2,84
17	2,55	2,87
18	2,58	2,9
19	2,6	2,93
20	2,62	2,96
21	2,64	2,98
22	2,66	3,01
23	2,68	3,03
24	2,7	3,05
25	2,72	3,07

Додаток 3

Критичні границі співвідношення R/S

Обсяг виборки n	Границі з імовірністю похибки $\beta = 0,1$		Обсяг виборки n	Границі імовірністю похибки $\beta = 0,1$	
	Нижня	верхня		Нижня	верхня
3	1,782	1,997	17	3,17	4,15
4	2,04	2,409	18	3,21	4,21
5	2,22	2,712	19	3,25	4,27
6	2,37	2,949	20	3,29	4,32
7	2,49	3,143	25	3,45	4,53
8	2,59	3,308	30	3,59	4,7
9	2,68	3,449	35	3,7	4,84
10	2,76	3,57	40	3,79	4,96
11	2,84	3,68	45	3,88	5,06
12	2,9	3,78	50	3,95	5,14
13	2,96	3,87	55	4,02	5,22
14	3,02	3,95	60	4,08	5,29
15	3,07	4,02	65	4,14	5,35
16	3,12	4,09	70	4,19	5,41



## ЗМІСТ

	Вступ.....	3
1	<b>ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ...</b>	4
	1.1. Означення основних понять і проблем надійності.....	4
	1.2. Відмови систем та їх відновлення.....	8
	1.3. Подія та ймовірність її появи.....	12
	1.4. Показники надійності.....	14
	1.5. Резервування у технічних системах.....	24
	1.6. Задачі і принципи забезпечення надійності... <i>Контрольні запитання</i> .....	32 37
2	<b>ЕКСПЕРИМЕНТ ТА СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ.....</b>	38
	2.1. Поняття про експериментальні дослідження.	38
	2.2. Планування та оцінка експерименту .....	42
	2.3. Похибки експерименту.....	57
	2.4. Відсів грубих похибок для малих виборок.....	59
	2.5. Відсів грубих похибок для виборок великих обсягів.....	62
	<i>Контрольні запитання</i> .....	65
3	<b>ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ЗАКони РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	66
	3.1. Основні теореми теорії ймовірностей.....	66
	3.2. Теоретичні закони розподілу випадкових величин.....	67
	3.3. Відповідність експериментальних даних теоретичному розподілу.....	78
	<i>Контрольні запитання</i> .....	84
4	<b>ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ТА ДЖЕРЕЛ ВОДОПОСТАЧАННЯ.....</b>	85
	4.1. Особливості встановлення критеріїв надійності систем водопостачання.....	85
	4.2. Класифікація систем водопостачання за ступенем надійності.....	91
	4.3. Забезпечення режимів стоку поверхневих джерел.....	95



	4.4. Прогнозування змінюваності гідрогеологічних показників підземних джерел водопостачання.....	105
	4.5. Вибір і оцінка надійності джерела водопостачання.....	107
	4.6. Забезпечення надійності водозаборів.....	113
	4.7. Забезпечення надійності систем водопостачання на стадії проектування.....	123
	<i>Контрольні запитання</i> .....	127
5	КРИТЕРІЇ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ВОДИ І СТИЧНИХ ВОД.....	128
	5.1. Формування розрахункових витрат води і стічних вод.....	128
	5.2. Спостереження за режимом подачі води.....	132
	5.3. Визначення імовірностних значень водорозбору.....	136
	<i>Контрольні запитання</i> .....	147
6	ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВОДОПРОВІДНИХ І ВОДОВІДВІДНИХ МЕРЕЖ.....	148
	6.1. Збір і аналіз статистичних даних про потік аварій.....	148
	6.2. Прогнозування мінливості критеріїв надійності у часі.....	160
	6.3. Забезпечення конструктивної надійності і режимів роботи вуличної водовідвідної мережі.....	168
	<i>Контрольні запитання</i> .....	179
7	7. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАПІРНО - РЕГУЛЮВАЛЬНИХ СПОРУД ТА НАСОСНИХ СТАНЦІЙ.....	180
	7.1. Надійність напірно регулювальних споруд.....	180
	7.2. Обґрунтування технологічної надійності насосних станцій.....	188
	7.3. Визначення показників надійності насосних станцій.....	190
	<i>Контрольні запитання</i> .....	199



Національний університет

8 водного  
та природоохоронного

<b>ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ</b>	
<b>ВОДООЧИСНИХ СПОРУД ТА СПОРУД</b>	
<b>ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД.....</b>	<b>200</b>
8.1.Технологічне забезпечення очищення природних вод.....	200
8.2.Забезпечення технологічної надійності очищення стічних вод.....	205
8.3. Обґрунтування надійності споруд очищення води.....	210
<i>Контрольні запитання.....</i>	219
Використана література.....	243
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>224</b>



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування