НАДІЙНІСТЬ ТА ВІДНОВЛЮВАНІСТЬ СИСТЕМ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

Мета лекції – сформувати системне розуміння надійності та відновлюваності сучасних систем водозабезпечення промислових будівель як складової загальної експлуатаційної безпеки об’єкта; навчити оцінювати вплив відмов елементів системи на функціонування будівлі та технологічного процесу, обґрунтовувати конструктивні, планувальні й інженерні рішення щодо резервування, локалізації пошкоджень, моніторингу та швидкого відновлення водозабезпечення.

План

1. Надійність систем водозабезпечення промислових будівель: поняття, структура та критерії оцінювання.
2. Фактори відмов і принципи забезпечення надійності на рівні будівлі та інженерної системи.
3. Резервування, автономність і цифровий моніторинг як засоби підвищення стійкості системи водозабезпечення.
4. Відновлюваність систем водозабезпечення: проєктні рішення, організація аварійного відновлення та післяаварійна модернізація.

1. Надійність систем водозабезпечення промислових будівель: поняття, структура та критерії оцінювання

Для промислової будівлі система водозабезпечення не повинна розглядатися лише як сукупність трубопроводів, насосів, резервуарів, арматури та водорозбірних пристроїв. З позицій сучасного будівництва вона є функціональною інженерною системою будівлі, від працездатності якої можуть залежати технологічний процес, санітарно-побутові умови, протипожежна безпека, температурний режим окремих приміщень, робота технологічного обладнання та можливість експлуатації самої будівлі. Тому поняття надійності необхідно розглядати ширше, ніж просто «відсутність аварій». Надійність – це здатність системи протягом заданого часу виконувати встановлені функції з необхідними параметрами в передбачених умовах експлуатації.

Для системи водозабезпечення такими параметрами можуть бути:

- необхідна витрата води;
- необхідний тиск у визначених точках;
- задана якість води;
- допустима температура;
- стабільність подачі;
- можливість роботи при відмові окремого елемента;
- допустима тривалість перерви;
- можливість локалізації аварії;
- можливість швидкого відновлення працездатності.

У науковій літературі надійність водорозподільних систем часто пов’язують із імовірністю виконання системою своїх функцій, а сучасні дослідження підкреслюють, що однієї характеристики надійності недостатньо: для критичної інфраструктури необхідно враховувати також резервування, стійкість, гнучкість і здатність до відновлення. (ScienceDirect)

Розглянемо надійність як властивість системи. Система може складатися з великої кількості елементів:

джерело → водоприймальна споруда → насосна станція → резервуар → магістраль → внутрішньомайданчикова мережа → вводи в будівлю → внутрішні мережі → технологічні та побутові споживачі.

При цьому відмова одного елемента не обов'язково повинна означати припинення роботи всієї системи. Наприклад, якщо на промисловому підприємстві пошкоджена одна ділянка магістрального трубопроводу, система з правильно організованою кільцевою схемою, запірною арматурою та резервним джерелом може продовжувати постачання води до більшої частини споживачів.

Саме тому важливо розрізняти: надійність елемента і надійність системи.

Насос може бути високонадійним, але якщо він є єдиним насосом без резервного агрегату, надійність усієї системи залишається обмеженою. Аналогічно, трубопровід може мати достатню міцність, але якщо його пошкодження призводить до припинення водопостачання всієї будівлі, схема системи є недостатньо стійкою до локальної відмови.

Функціональна надійність. Система може бути фізично справною, але не виконувати необхідну функцію.

Наприклад:

- насос працює, але тиск на верхньому рівні будівлі недостатній;
- трубопровід не пошкоджений, але пропускної здатності недостатньо;
- резервуар заповнений, але відсутня електроенергія для насосного обладнання;
- вода подається до будівлі, але не забезпечує необхідну витрату для технологічного процесу;
- окрема ділянка мережі справна, але її неможливо відключити без припинення роботи всієї системи.

Отже, оцінюючи надійність, необхідно перевіряти не тільки фізичний стан конструкцій та обладнання, а й здатність системи забезпечувати необхідний експлуатаційний результат.

Надійність і технологічний процес. Особливість промислових будівель полягає в тому, що різні споживачі можуть мати принципово різні вимоги до води. Наприклад: господарсько-побутове водопостачання; виробниче водопостачання; оборотна система; система охолодження; система пожежогасіння; спеціальні технологічні потреби.

Тому одна й та сама аварія може мати різні наслідки для різних частин підприємства.

Якщо припинення господарсько-побутового водопостачання викликає переважно обмеження експлуатації, то припинення охолодження технологічного обладнання може призвести до зупинки виробничої лінії. Відмова пожежного водопроводу створює вже інший тип ризику – зниження рівня пожежної безпеки будівлі.

Отже, на етапі проєктування необхідно встановити ієрархію споживачів за критичністю. Це безпосередньо впливає на схему мережі; кількість вводів; резервування насосів; об'єм запасу води; кількість запірної арматури; поділ мережі на секції; розміщення технічних приміщень; доступність обладнання для ремонту.

Надійність і будівельні рішення. Надійність системи водозабезпечення формується не тільки гідравлічним розрахунком. Вона залежить від того, як система інтегрована в будівлю.

Наприклад, трубопровід, прокладений у важкодоступній зоні, може бути складнішим для ремонту, ніж аналогічний трубопровід у доступній інженерній шахті. Прокладання трубопроводу через деформаційний шов потребує спеціального рішення щодо компенсації переміщень. Проходки через стіни та перекриття повинні враховувати можливість переміщень конструкцій, герметичність і ремонтопридатність. Тому надійність необхідно оцінювати на трьох взаємопов'язаних рівнях [1]:

елемент → інженерна система → будівля/технологічний комплекс.

Саме такий системний підхід є важливим для сучасного проєктування.

2. Фактори відмов і принципи забезпечення надійності на рівні будівлі та інженерної системи

Відмова системи водозабезпечення може виникнути з різних причин, і далеко не всі вони пов'язані безпосередньо з якістю труб або обладнання.

Для промислової будівлі доцільно розглядати чотири основні групи факторів:

1. фізичне старіння та зношення;
2. гідравлічні та експлуатаційні перевантаження;
3. зовнішні впливи;
4. помилки проєктування, монтажу або експлуатації.

Фізичне старіння. Трубопроводи, арматура, насоси, резервуари та інші компоненти мають певний ресурс. Для трубопроводів характерними проблемами є корозія; абразивне зношення; деформації; розгерметизація стиків; втрата несучої здатності; пошкодження теплоізоляції; заморожування окремих ділянок.

Для насосного обладнання: зношення робочих коліс; порушення центрування; вібрація; зниження ККД; відмова електродвигуна; несправність системи керування.

Для будівельних конструкцій резервуарів важливими стають: тріщиноутворення; корозія арматури; порушення гідроізоляції; деформації основи; температурні та усадкові деформації.

Таким чином, надійність системи водозабезпечення необхідно пов'язувати з життєвим циклом будівлі та її інженерних систем. ISO 24516-2, наприклад, розглядає управління активами водопровідної інфраструктури, включаючи насосні станції, резервуари, баки, установки очищення та інше обладнання, саме з позиції збереження їхньої функціональної цінності протягом життєвого циклу [2].

Гідравлічні фактори. Надійність системи неможливо забезпечити, якщо її розрахунок виконаний лише для одного режиму роботи. Промислове підприємство має змінні режими: максимальне водоспоживання; мінімальне водоспоживання; пуск обладнання; аварійні режими; пожежний режим; робота частини технологічних ліній; відключення окремих насосів. Тому при проєктуванні необхідно перевіряти систему в декількох розрахункових сценаріях.

Наприклад, відключення одного насоса не повинно автоматично означати втрату необхідного тиску, якщо система за умовами експлуатації повинна мати резервування. Аналогічно, локальне перекриття трубопроводу не повинно залишати без води всю будівлю, якщо передбачено секціонування.

Зовнішні впливи. Сучасне розуміння надійності передбачає врахування не тільки штатних режимів, але й надзвичайних подій. До них можуть належати:

- аварійне відключення електроенергії;
- підтоплення;
- екстремальні температури;
- механічне пошкодження трубопроводу;
- пожежа;
- техногенні аварії;
- порушення роботи зовнішніх мереж;
- пошкодження транспортної або енергетичної інфраструктури.

Для України особливого значення набуває також проєктування систем, здатних функціонувати за умов часткового пошкодження інфраструктури та тривалого порушення нормального режиму експлуатації. Сучасні дослідження водопровідних мереж прямо розглядають їх як критичну інфраструктуру, вразливу до природних і техногенних подій, а також до збройних конфліктів.

Принцип локалізації аварії. Один із фундаментальних принципів надійного проєктування – аварія повинна залишатися локальною[3]. Це означає, що пошкодження одного елемента не повинно автоматично переводити всю систему в непрацездатний стан. Для цього використовують запірну арматуру; секціонування; кільцеві мережі; паралельні трубопроводи; резервні насоси; резервуари; альтернативні вводи; незалежні джерела живлення; технологічне розділення потоків.

Наприклад, якщо внутрішньомайданчикова мережа має кільцеву структуру, окрему пошкоджену ділянку можна відключити, а воду подати до інших частин підприємства альтернативним напрямком. Тут проявляється зв'язок між геометрією мережі та надійністю. Дослідження показують, що топологічна структура мережі впливає на її здатність протидіяти відмовам, хоча сама топологічна характеристика не може повністю описати загальну стійкість системи.

Надійність як проєктна характеристика повинна закладатися ще до початку будівництва. Це означає необхідність перевіряти:

1. Архітектурно-планувальне рішення: чи є доступ до інженерних приміщень і комунікацій?
2. Конструктивне рішення: навантаження від резервуарів, трубопроводів та обладнання.
3. Інженерне рішення: забезпечування необхідного тиску і витрат.
4. Експлуатаційне рішення: чи можна провести ремонт без зупинки всього підприємства.
5. Аварійне рішення: функціонування системи при частковій відмові.

Це переводить поняття надійності з рівня «якісного обладнання» на рівень архітектурно-конструктивної та інженерної організації будівлі.

3. Резервування, автономність і цифровий моніторинг як засоби підвищення стійкості системи водозабезпечення

Одним із головних способів підвищення надійності є резервування. Резервування означає створення додаткової можливості виконання функції у випадку відмови основного елемента. Існують різні рівні резервування:

- резервування обладнання;
- резервування трубопроводів;
- резервування джерел;
- резервування електроживлення;
- резервування запасу води;
- резервування маршрутів подачі;
- функціональне резервування.

Резервування насосних агрегатів. Для насосної станції можна передбачити декілька робочих і резервних агрегатів. Але необхідно аналізувати не тільки кількість насосів, а й можливість автоматичного включення резервного агрегату; достатність електричної потужності; можливість ручного керування; доступність обладнання для ремонту; взаємозамінність агрегатів; наявність запасних комплектуючих.

Таким чином, резервування повинно охоплювати весь функціональний ланцюг, а не один його компонент.

Резервування трубопроводів. Для промислового підприємства особливо ефективними можуть бути кільцеві схеми. У найпростішому випадку мережа має

два можливих напрями подачі води до окремого району. Якщо одна ділянка виходить з експлуатації, її відключають арматурою, а водоподача продовжується іншим маршрутом. Така схема одночасно підвищує надійність; ремонтопридатність; гнучкість експлуатації; можливість поетапної реконструкції.

У наукових роботах резервування розглядається як одна з фундаментальних властивостей водорозподільної системи поряд із надійністю, стійкістю та робастністю.

Автономність. Для критичних промислових об'єктів важливим є питання: скільки часу будівля може функціонувати без нормального зовнішнього водопостачання. Відповідь визначається запасом води; добовим водоспоживанням; пріоритетами споживачів; можливістю повторного використання води; резервним джерелом; можливістю підвезення води; енергозабезпеченням.

Для цього доцільно формувати сценарії.

Наприклад, наступна послідовність: нормальний режим → аварійне відключення → автоматичне переключення → робота резервного джерела → локалізація аварії → ремонт → повернення до нормального режиму, дозволяє оцінити не лише факт наявності резерву, а його реальну ефективність.

Оборотні системи як елемент надійності. У промислових будівлях значний резерв стійкості може створюватися за рахунок оборотного водозабезпечення. Якщо технологічна вода після використання не скидається, а повертається до системи після необхідного охолодження або очищення, зменшується залежність підприємства від зовнішнього джерела. Оборотна система створює власні критичні компоненти: теплообмінники; градирні або інші охолоджувальні пристрої; насоси; фільтри; трубопроводи; системи контролю якості, тому вона повинна проєктуватися як замкнений функціональний комплекс із резервуванням критичних елементів.

Цифровий моніторинг. Сучасна система водозабезпечення поступово переходить від принципу: «аварія → виявлення → ремонт» до принципу: «моніторинг → виявлення відхилення → прогнозування → попереджувальна дія»[4]. Для цього можуть використовуватися датчики тиску; витратоміри; датчики рівня; датчики температури; контроль енергоспоживання насосів; автоматизовані системи керування; дистанційна передача даних; цифрові моделі системи. Моніторинг дозволяє виявляти нетипові зміни. Наприклад, поступове зниження тиску при незмінному водоспоживанні може свідчити про витік або несправність насоса; зміну гідравлічного режиму та часткове перекриття трубопроводу; несправність регулювальної арматури. Сучасні системи автоматизованого керування водорозподілом можуть працювати з тиском, рівнями резервуарів та іншими параметрами в реальному часі.

BIM та цифрова модель. У цифровій моделі можна пов'язувати між собою основні елементи трубопровід; арматуру; насос; резервуар; технічне приміщення;

паспорт обладнання; дату монтажу; технічний стан; історію ремонтів, що є інформаційною основою експлуатації будівлі.

4. Відновлюваність систем водозабезпечення: проєктні рішення, організація аварійного відновлення та післяаварійна модернізація

Надійність відповідає на питання: наскільки ймовірно, що система виконуватиме свої функції, відновлюваність: як швидко та з якими ресурсами система може повернутися до працездатного стану після відмови. Ця відмінність є принциповою. Система може мати відносно низьку ймовірність відмови, але якщо аварійний ремонт займає декілька тижнів, її експлуатаційні наслідки можуть бути значними. І навпаки, система може мати окремі відмови, але завдяки доступності обладнання, секціонуванню та простоті ремонту швидко повертатися до нормального стану. Сучасні підходи до стійкості водної інфраструктури прямо пов'язують її зі здатністю витримувати зовнішній вплив і швидко відновлювати функціонування.

Для промислової будівлі можна виділити основні показники відновлюваності:

- час виявлення аварії;
- час локалізації;
- час доступу до пошкодженого елемента;
- час демонтажу;
- доступність запасних компонентів;
- час монтажу нового елемента;
- час випробувань;
- час повернення системи до нормальної роботи.

Умовно загальний час відновлення можна представити:

$$T_{відн} = Tв_{иявл} + T_{лок} + T_{доступ} + T_{рем} + T_{випр} + T_{пуск}.$$

Особливо важливими є $T_{доступ}$ і $T_{рем}$. Якщо трубопровід розміщений у недоступній шахті, ремонт може потребувати демонтажу значної частини оздоблення або конструкцій. Якщо ж передбачені ревізійні отвори, доступні технічні коридори та правильно організовані проходки, час ремонту значно скорочується.

Ремонтопридатність як частину проєкту необхідно закладати ще на стадії архітектурно-конструктивного проєктування. При цьому потрібно передбачати:

- доступ до запірної арматури;
- доступ до насосного обладнання;
- монтажні прорізи;
- проходи для заміни великих агрегатів;
- технічні коридори;
- ревізійні люки;

- можливість відключення окремих секцій;
- простір для демонтажу трубопроводів.

Це особливо важливо для промислових будівель із великими технологічними установками. Недостатньо спроєктувати трубопровід так, щоб він фізично помістився у приміщенні. Необхідно забезпечити простір життєвого циклу — монтажу, огляду, ремонту, заміни та модернізації.

Аварійне відновлення. У разі пошкодження системи алгоритм відновлення доцільно будувати послідовно:

1. Виявлення аварії. Встановлюється місце і характер пошкодження.

2. Локалізація. Закриваються відповідні засувки або клапани.

3. Забезпечення пріоритетних споживачів. Організовується альтернативна подача води.

4. Оцінювання технічного стану. Визначається, чи можливий ремонт або необхідна заміна елемента.

5. Виконання ремонтних робіт. Пошкоджена ділянка відновлюється.

6. Випробування. Перевіряються герметичність, тиск, витрата та інші необхідні параметри.

7. Повернення до штатної схеми. Система переводиться з аварійного режиму до нормального.

Такий підхід відповідає сучасній логіці, де планування включає підготовку, реагування та відновлення після події. EPA, наприклад, рекомендує для водних систем окремі плани реагування на аварії та пов'язує їх із попередньою оцінкою ризиків і стійкості.

Відновлення після масштабного пошкодження

Для промислових будівель важливо розглядати два принципово різні варіанти пошкодження.

Перший – локальна аварія. Наприклад, пошкоджена одна ділянка внутрішньої мережі. У такому випадку основним завданням є швидка локалізація і заміна пошкодженого елемента.

Другий – системне пошкодження. Наприклад, одночасно порушена робота зовнішньої мережі, електроживлення та окремих внутрішніх компонентів. У цьому випадку необхідно переходити до режиму мінімально необхідної функціональності. Першочергово забезпечуються найбільш критичні споживачі, а другорядні можуть тимчасово відключатися. Це принципово важливо для проєктування систем у районах, де можливі тривалі порушення функціонування інфраструктури.

Відновлення як можливість модернізації. Після аварії не завжди доцільно просто відновлювати систему до її попереднього стану.

Наприклад: було: один ввід → одна магістраль → один насосний агрегат. Після реконструкції: два вводи → кільцева мережа → резервні насосні агрегати → резервний запас води → автоматизований контроль. Тобто відновлення перетворюється на підвищення стійкості, саме цей підхід особливо важливий для

післявоєнної відбудови: відновлена будівля не повинна просто відтворювати попередню вразливу схему, якщо технічні та економічні умови дозволяють створити більш адаптивну систему. Сучасні дослідження стійкості водорозподільних мереж наголошують на необхідності врахування не тільки надійності, а й автономності, гнучкості, готовності та здатності до відновлення. [5].

Відновлюваність стає не завершальною операцією після аварії, а складовою проєктної концепції будівлі. Для сучасної промислової будівлі систему водозабезпечення доцільно розглядати як критичну інженерну систему, інтегровану в архітектурно-конструктивну та технологічну структуру підприємства. Її надійність визначається не одним параметром, а сукупністю властивостей: надійність → резервування → стійкість → ремонтопридатність → моніторинг → відновлюваність. при цьому кожна з цих характеристик має просторовий і конструктивний прояв.

Наприклад: резервування потребує місця для додаткового обладнання; кільцева мережа впливає на трасування трубопроводів; резервуари формують додаткові навантаження на конструкції; насосні станції потребують відповідних фундаментів та монтажних зон; секціонування визначає розташування арматури; ремонтопридатність визначає доступність технічних приміщень; цифровий моніторинг потребує інтеграції датчиків і систем автоматизації; відновлюваність повинна враховувати можливість швидкої заміни компонентів.

Таким чином, надійна система водозабезпечення – це система, у якій передбачено, що відмова окремого елемента можлива, але вона не повинна призводити до неконтрольованої втрати функціональності всієї промислової будівлі.

Література

1. Assad A., Bouferguene A. Resilience assessment of water distribution networks – Bibliometric analysis and systematic review. *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 607. Art. 127522. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127522. URL: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127522. (ScienceDirect)
2. Moglia M., Sharma A. K., Burn S. Assessing the effectiveness of water distribution network resilience metrics. *Water Research*. 2024. Vol. 248. Art. 120820. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120820. URL: https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120820. (ScienceDirect)
3. Tanyimboh T. T., Siew C., Saleh S., Czajkowska A. Comparison of surrogate measures for the reliability and redundancy of water distribution systems. *Water Resources Management*. 2016. Vol. 30. P. 3535–3552. DOI: 10.1007/s11269-016-1369-8. URL: https://doi.org/10.1007/s11269-016-1369-8. (Springer Nature)
4. Ostfeld A., Shamir U. Incorporating reliability in optimal design of water distribution networks—review and new concepts. *Reliability Engineering*

& System Safety. 1993. Vol. 42, No. 1. P. 5–11. DOI: 10.1016/0951-8320(93)90049-5. URL: https://doi.org/10.1016/0951-8320(93)90049-5. (ScienceDirect)

5. Pietrucha-Urbanik K., Rak J., eds. Water Supply System Reliability, Resilience, Safety and Risk Modelling & Assessment. 3rd ed. Basel : MDPI, 2026. 212 p. ISBN 978-3-7258-7963-2. DOI: 10.3390/books978-3-7258-7964-9. URL: https://doi.org/10.3390/books978-3-7258-7964-9. (MDPI)

Water safety plan manual, 2nd ed. (2023).