

## ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ МЕТОДОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ СХЕМ ПРОМИСЛОВОГО ВОДОСПОЖИВАННЯ

Г.О. Статюха, А. М. Шахновський, Я. Єжовський\*, А. Єжовська \*, О. О. Квітка  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ  
e-mail: ArcadyShakhn@mail.ru

\*Rzeszów University of Technology, Department of Chemical and Process Engineering,  
Poland  
e-mail: ichjj@prz.edu.pl

*Робота присвячена деяким практичним аспектам проектування і промислового впровадження схем водоспоживання, водоочищення та водовідведення. У фокусі досліджень: застосування статистичного аналізу до вивчення зібраних на виробництві вихідних даних для модернізації схем водоспоживання, а також заснована на модельному підході оцінка доцільності впровадження схем водоспоживання у експлуатацію. Запропоновані підходи можуть бути застосовані на різних рівнях ієрархії технологічних схем водного господарства промислового підприємства.*

*Ключові слова: схема водоспоживання, оптимізація, промислове впровадження, підготовка даних, заснований на моделюванні сценарій.*

### Вступ

Важливою передумовою сталого розвитку суспільства є впровадження сучасних ресурсозберігаючих технологій, екологізація вітчизняних промислових виробництв, зокрема, підсистем-складових водного господарства підприємства.

Застосування сучасних засобів обчислювальної техніки і математичних методів оптимізації дозволяє розробити ефективні технічні рішення по повторно-багатократному водоспоживанню і децентралізованому водоочищенню [1-3]. Запропоновані рядом авторів алгоритмічні процедури підтримки ухвалення оптимальних проектних рішень по водоспоживанню, водовідведенню і водоочищенню пройшли теоретичну перевірку і довели свою ефективність на практиці [2-5].

Проте ефективні в математичному сенсі технічні рішення подекуди не знаходять відгуку у виробничників. Причинами відмови від впровадження згаданих прогресивних розробок, окрім недостатньо послідовної державної політики з охорони водних ресурсів, є певні недоліки у загальноприйнятих процедурах проектування схем водного господарства (СВГ). Так, при проектуванні СВГ покладається, що вихідні дані для розрахунку є детермінованими. Проте на практиці інформація, необхідна для виконання розрахунків СВГ, має значний ступінь невизначеності, як у випадку проектування нового виробництва, так і при модернізації вже існуючих систем [6]. Між тим, точність покладених у основу розрахунку технологічних та економічних параметрів у значній мірі визначає ефективність розрахунку.

Крім того, традиційне обґрунтування доцільності реалізації проекту – розрахунок очікуваного економічного ефекту, – в даному випадку виявляється неефективним, недостатньо переконливим для осіб, що ухвалюють рішення.

Таким чином, процедура проектування оптимальних схем водного господарства має включати наступні етапи:

1. Підготовка та верифікація вихідних даних для розрахунку.
2. Власне розрахунок (технологічне проектування) СВГ.
3. Дослідження доцільності впровадження оптимізованої СВГ у експлуатацію.

В даній роботі увагу зосереджено на етапах підготовки початкових даних та оцінювання доцільності впровадження оптимізованої СВГ. Пошук шляхів збільшення точності процедур синтезу СВГ є темою окремого дослідження [5].

Для обробки вихідних даних в умовах невизначеності авторами застосовано методи прикладної статистики. Статистичні методи обробки вихідних даних показали свою ефективність при побудові регресійних поліноміальних моделей «вхід-вихід» [7]. Математичні методи узгодження даних, виявлення і зменшення похибок спостереження технологічних даних було досліджено, зокрема, у [8-11].

Випадки невизначеності та неповноти даних при дослідженні технологічних схем в цілому розглядаються зокрема у [6]; при дослідженні технологічних схем водного господарства (переважно в контексті дослідження надійності отриманих проектних рішень) – у [12-14]. Так, у [12] вивчаються питання гнучкості та робастності результатів розрахунку СВГ. У [13] запропоновано підхід до синтезу СВГ на основі методу структурних параметрів, причому невизначеність враховується шляхом модифікації задачі лінійного програмування на основі методів нечіткої логіки. Автори [14] пропонують враховувати невизначеність шляхом багатоетапного вирішення вихідної задачі нелінійного програмування.

Пропоновані у [12-14] підходи передбачають врахування невизначеності на етапі синтезу СВГ (етап 2 представленої вище процедури проектування). Вказаний етап навіть у випадку припущення про детермінованих даних та стаціонарний режим протікання процесів відрізняється достатньо складним методологічним апаратом [1, 3-5]. У цих умовах введення спеціальних методів врахування невизначеності ускладнює пошук оптимуму і може негативно позначитися на швидкості і ефективності реалізації етапу синтезу СВГ.

Дослідженню даних, необхідних для синтезу СВГ, присвячені роботи [15, 16]. Особливістю [15] є те, що серед елементів СВГ не розглядаються широко поширені на виробництві масообмінні процеси. У [16] моделюється СВГ фіксованої структури під впливом випадкових збурень, формулюється задача підготовки вихідних даних для розрахунку.

## **1 Статистична обробка вихідних даних для проектування СВГ**

### **1.1 Ранжирування забруднювачів**

Під час збирання початкових даних про виробництво на стадії попереднього аналізу мають бути ухвалені рішення про можливе умовне об'єднання кількох процесів, що споживають воду, а також про об'єднання у групи забруднюючих домішок.

Необхідність зменшення кількості враховуваних забруднюючих домішок шляхом їх групування, виключення із розгляду незначимих домішок, умовного зменшення кількості водоспоживачів зумовлена особливостями процесу проектування СВГ. Таке спрощення та агрегування має на меті зменшення розмірності задачі оптимізації та збільшення ймовірності досягнення оптимуму на етапі синтезу оптимальних СВГ.

Таким чином, попередньо має бути вирішена задача ранжування наявних у системі забруднювачів за ступенем їх важливості. Оскільки подібні задачі вирішуються переважно за даними експертних опитувань, виникає проблема оцінки ступеню узгодженості думок експертів [17]. Важливість кожного забруднювача дає змогу оцінити величина рангу. Ранг – місце, яке надає експерт (фахівець під час опитування, автор статті, тощо) певній забруднюючій домішці, розташовуючи всі забруднювачі у відповідності до їх передбачуваної (кількісно невідомої) значимості.

Узгодженість експертних оцінок може бути перевірена із використанням методів перевірки статистичних гіпотез [18]. Гіпотеза про узгодженість думок експертів може бути прийнята, якщо теоретичне (табличне) значення критерію Пірсона  $\chi^2_{T}$  є меншим за розрахункове значення даного критерію ( $\chi^2$ ). Якщо думки експертів у достатній мірі узгоджені, можна побудувати діаграму рангів градусів (забруднювачі в у порядку зменшення сумарного рангу за думками експертів) - рис. 1. У значній кількості випадків діаграма рангів надає інформацію для виключення із розгляду частини забруднюючих домішок. Так, для прикладу СВГ будівельного виробництва ([18], див. рис. 1а), забруднювачі від 4 аж до 10 можуть бути виключені з подальшого розгляду (у припущенні, що їх вплив не перевищує певної границі випадкових впливів на процес). Найістотнішими забруднювачами в даному випадку визнано: рН, загальний солесміст, вміст сульфатів, ХСК.

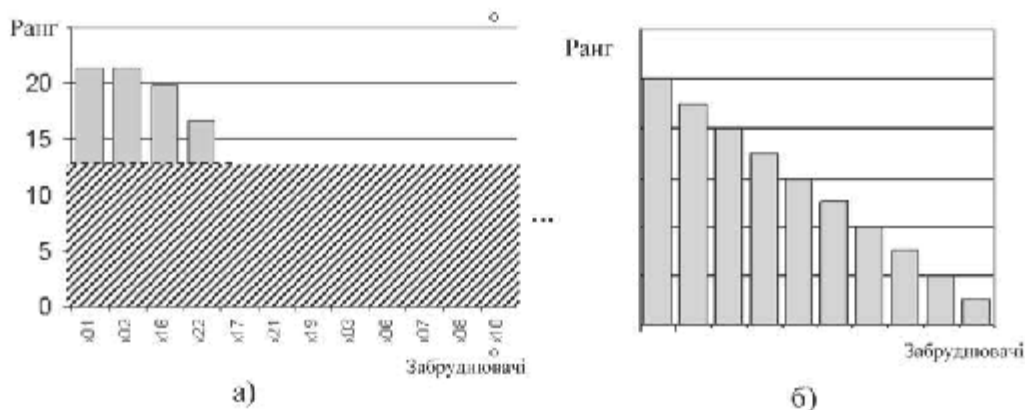


Рис. 1. Виключення з розгляду незначимих забруднюючих домішок за діаграмою рангів:

a – нелінійний розподіл рангів; b – розподіл рангів, близький до рівномірного.

Якщо розподіл рангів чинників на діаграмі близький до рівномірного (рис. 1б), рекомендується включати до розгляду всі забруднювачі.

### 1.2 Оцінювання параметрів процесів водоспоживання

Для розрахунку оптимальних СВГ у випадку схем водоспоживання та водовідведення (СВВ) необхідна наступна інформація: максимальна дозволена концентрація забруднювачів на вході до кожного процесу, що споживає воду; інтенсивність забруднення води кожним із водоспоживачів (масове навантаження для кожної із забруднюючих домішок); номінальна концентрація забруднювачів у воді на виході з кожного процесу, що споживає воду.

Ідентифікація моделі  $i$ -того технологічного процесу, що споживає воду, зводиться до знаходження масового навантаження  $m_{ci}$  у рівнянні (1) матеріального балансу цього технологічного процесу.

$$m_{ci} = f(C_{c,вх} - C_{c,вих}), c = \overline{1, Nc}, i = \overline{1, No}, \quad (1)$$

де  $m_{ci}$  – параметр моделі (масове навантаження);  $f$  – витрата води;  $C_{c,вх}, C_{c,вих}$  – концентрації забруднюючої домішки  $c$  відповідно у воді на вході та на виході з процесу;  $Nc$  – кількість забруднюючих домішок у системі;  $No$  – кількість водоспоживачів у системі

Масове навантаження є специфічною характеристикою процесів забруднення води, що дає уявлення про процес водоспоживання і дозволяє ідентифікувати спрощені математичні моделі водоспоживачів у складі загальної моделі СВВ [3]. Використання масового навантаження є загальноприйнятим у практиці проєктування СВГ, проте фахівцями подекуди виказується сумнів у тому, що величини масових навантажень можуть бути оцінені з достатньою точністю [4, 19]. Для оцінки надійності ідентифікації моделей водоспоживачів (оцінки значень масового навантаження) пропонується застосування статистичного аналізу.

Для стаціонарних умов у якості оцінки масового навантаження можна прийняти усереднені в границях певного часового інтервалу емпіричні дані [20], з наступним розрахунком значень масових навантажень за рівнянням (1). Необхідні значення величин  $C_{c,вх}, C_{c,вих}, f$  можуть бути отримані в процесі нормальної експлуатації об'єкта.

Виходячи із того, що вибіркове середнє є ефективною оцінкою генерального середнього у випадку, коли генеральна сукупність, з якої взято дану вибірку, розподілена нормально, ставиться вимога нормальності статистичного розподілу вимірюваної величини. На практиці це означає, що про надійність результатів, отриманих за методом безпосереднього аналізу, можна говорити лише у випадку добре налагодженого технологічного процесу, мінімального впливу на вимірювальні величини зовнішніх факторів.

Застосувавши до технологічних даних відомі методи встановлення типу закону розподілу вибіркової сукупності [17], можна зробити висновок про узгодженість або неузгодженість даних

із теоретичним нормальним розподілом. Позитивний результат статистичної перевірки дає право використовувати результати експериментів у подальших розрахунках (згаданим вище чином). Негативний же результат (розподіл експериментальних даних відмінний від нормального) у даному контексті може свідчити, зокрема, про значне відхилення режиму водоспоживання від статичного, наявність значимих похибок вимірювання, наявність неврахованих факторів, що значимо впливають на процес водоспоживання.

У якості прикладу наведемо оцінювання значень масового навантаження при проектуванні СВГ фармацевтичного виробництва [21]. Вивчалася масове навантаження по завислих речовинах для однієї з груп водоспоживачів – автоматичних машин миття флаконів препарату А. З метою ідентифікації даної характеристики вивчено 78 проб води. Експеримент проводився наступним чином: одночасно вимірювалося концентрації завислих речовин на вході та виході процесу та відповідне значення витрати води. На рис. рис. 2, а наведено результати вимірів витрати води. Оскільки масове навантаження не вимірювалося безпосередньо, в першу чергу було оцінено близькість розподілу результатів прямих вимірів до нормального розподілу (рис. 2, б,в). Як можна бачити з рис. 2, в, експериментальні значення лежать всередині довірчого інтервалу (рівень значимості 5%).

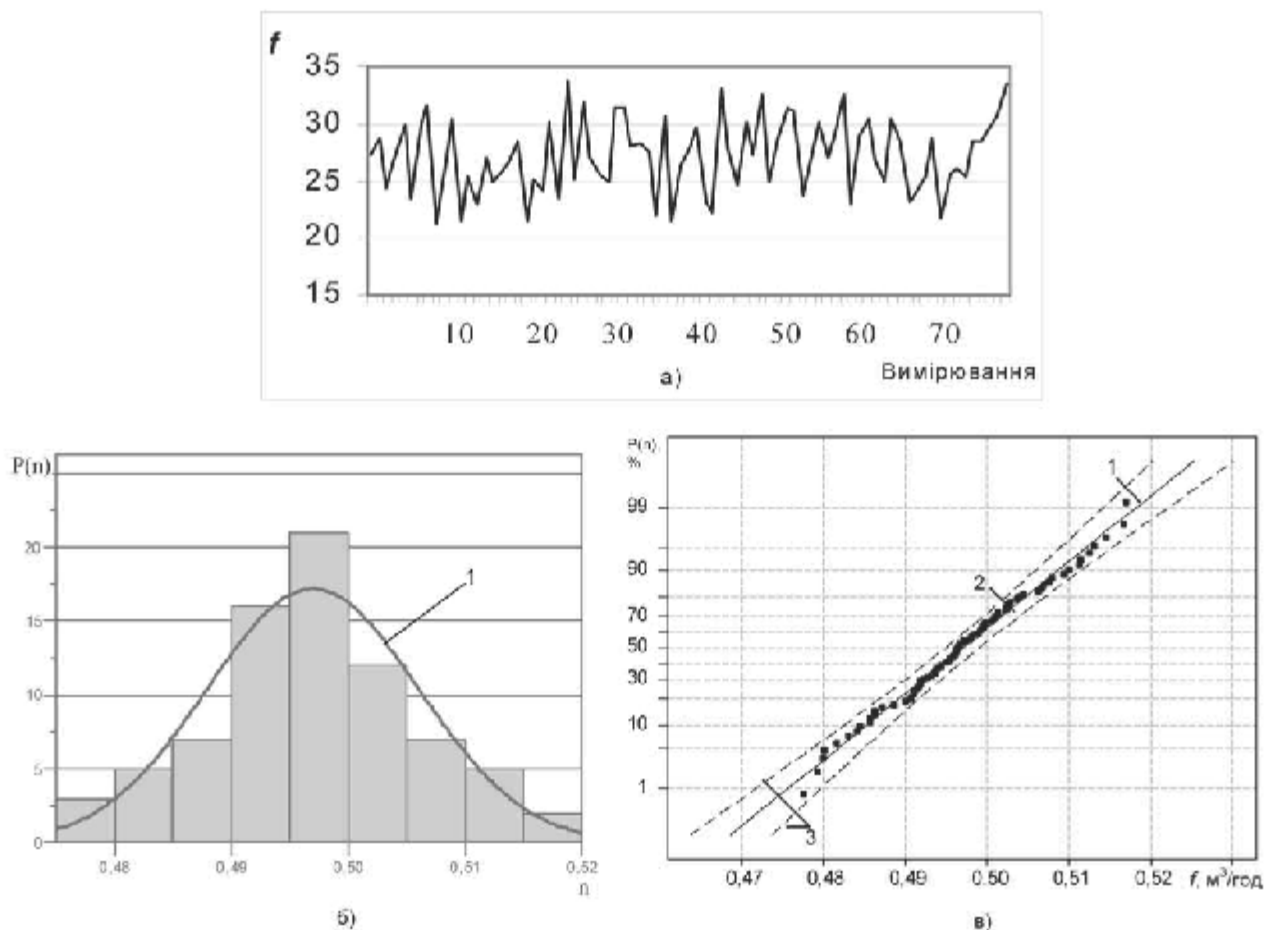


Рис. 2. До оцінювання масового навантаження по завислих речовинах:  
 а – результати вимірів витрати води  $f$ , кг/год; б-в – порівняння експериментальних даних із теоретичним нормальним розподілом (б–традиційне представлення; в-представлення у координатах “імовірнісного паперу”); 1 – експериментальні значення (точки); 2 – лінія теоретичного нормального розподілу; 3 – границі довірчого інтервалу.

Перевірка гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності масових навантажень здійснювалася за критерієм згоди Пірсона. Основні статистичні характеристики

досліджуваної вибірки наступні: об'єм вибірки  $n=78$ ; вибіркове середнє 0,49715 мг/л; стандартне відхилення  $S_m = 0,0088504$  мг/л.

Розрахункове значення критерію Пірсона:  $\chi_p^2 = 3,1286$ . Рівень значимості для визначення табличного значення критерію Пірсона прийнято 5%; кількість ступенів свободи  $f = 4$ . Табличне значення критерію Пірсона:  $\chi_T^2 = 9,5$ .

За результатами перевірки при рівні значимості 5% гіпотеза про нормальний розподіл приймається. Отже, у якості оцінки величини масового навантаження може бути прийняте вибіркове середнє  $\bar{m}$  відповідних вимірів.

## 2 Сценарійне оцінювання доцільності впровадження оптимізованих СВГ в експлуатацію

Обґрунтувати доцільність впровадження оптимізованих схем у промислову експлуатацію, оцінити вплив на експлуатаційні характеристики схеми технологічних та економічних параметрів непевності дозволяє моделювання різних сценаріїв функціонування СВГ. У представленому дослідженні було використано такі засновані на моделюванні підходи:

1. Багатоваріантний розрахунок економічного ефекту шляхом варіювання в деякому діапазоні показників, що його визначають; побудова і аналіз «поверхонь відгуку» економічного ефекту (*техніко-економічний підхід*).

2. Імітаційне моделювання роботи схем водного господарства і (або) технологічного процесу в цілому (*технологічний підхід*).

3. Формулювання і розрахунок індикаторів водо-ефективності (*узагальнений підхід на основі теорії сталого промислового розвитку*).

Зокрема, технологічний підхід передбачає моделювання роботи схем водного господарства і (або) технологічного процесу в цілому до і після оптимізації (у випадку модернізації існуючих СВГ), в режимі нормальної експлуатації і при порушенні технологічного режиму (у випадках проектування нових процесів і модернізації існуючих СВГ). Задача даного етапу дослідження – перевірка достатності коефіцієнтів запасу  $\delta = 10\%$  [22, 23], включених в оптимізаційну модель СВГ. Для моделювання складу потоків в СВГ використовувалися універсальні моделюючі пакети Hysys/UniSim Design, Aspen Plus.

Комп'ютерне моделювання включало наступні стадії:

1) Представлення технологічних одиниць, що складають СВГ (специфічні для даної схеми технологічні апарати-водоспоживачі, а також дільники і змішувачі потоків, збірники води тощо), у форматі моделюючої програми.

2) Моделювання пуску і роботи СВГ у нормальному режимі. При цьому, зокрема, стало очевидним, що в початковий момент часу (пуск схеми в експлуатацію) нормативи водоспоживання не виконуються через відсутність води повторного використання.

3) Власне, вивчення надійності СВГ шляхом нанесення випадкових збурень імпульсного і східчастого характеру по різних каналах

Підхід забезпечує також вирішення зворотної проблеми: визначення максимальних можливих концентраційних змін в кожному водному користувачі, які не здійснюють значимого впливу на технологічний режим СВГ при даному значенні коефіцієнта запасу.

У якості прикладу наведемо оцінювання доцільності впровадження оптимізованої СВГ ділянки нафтопереробного заводу [24]. Згадану СВГ було оптимізовано із використанням процедури синтезу з [1]. Оптимізація забезпечує 24.3% із збереження свіжої води (з коефіцієнтом запасу 10%). На рис. 3 представлено порівняння концентрацій на вході процесів, що споживають воду ( $C_{ex}$ ) в оптимізованій СВГ в умовах нормальної експлуатації і після нанесення збурення. У якості збурення виступала значна ступінчаста зміна масового навантаження ключового забруднювача (ХСК, мгО<sub>2</sub>/л) на 69,2 мг/л (приблизно у п'ятдесят разів). Місце нанесення збурення – процес 1 (лужне

очищення). Зауважимо, що на рис. 3 заради інформативності представлення відображена зміна концентрації тільки для трьох забрудників, присутніх у системі; також показано тільки шість з восьми водоспоживачів.

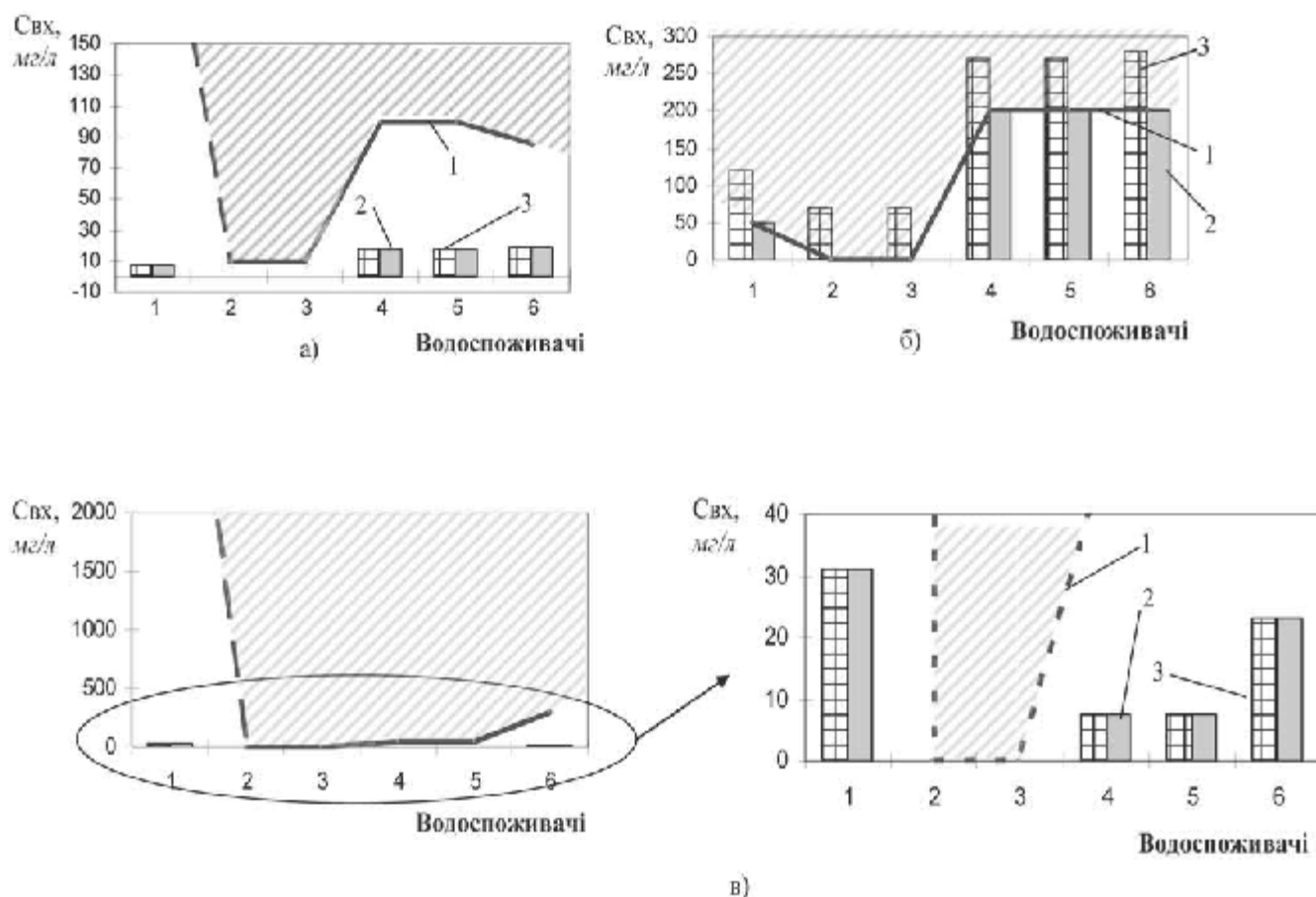


Рис. 3. Розрахункові значення концентрацій на вході процесів водоспоживання у оптимізованій схемі, мг/л: а) за загальним солесмістом; б) за ХСК; в) за сірководнем; 1 – номінальні значення; 2 – значення у режимі нормальної експлуатації; 3 – значення після нанесення збурення.

Як можна бачити з рис. 3, оптимізована СВГ у режимі нормальної експлуатації задовольняє технологічним обмеженням: забрудненість води на вході процесів (стовпці) не перевищує номінальних значень для кожного процесу. Результати моделювання (рис. 3) ілюструють також наступний факт. Максимальне повторне використання води досягається при максимальному – гранично можливому – значенні концентрації на вході технологічних процесів. При наявності у системі кількох забруднюючих домішок концентрація однієї з них (ключової) завжди є лімітуючою, обмежує подальше збільшення ступеню повторного використання води. Отже, у оптимізованій СВГ концентрація ключового забруднювача на вході процесів-водоспоживачів досягає граничних значень (рис. 3, б), тоді як по інших забруднювачах СВГ зберігає ресурс економії води (рис. 3, а, в). Як наслідок, оптимізована СВГ є найбільш чутливою до змін концентрації саме ключового забруднювача (рис. 3, б). Вказане перевищення номінальних значень вхідної концентрації для деяких водоспоживачів у складі СВГ є неприпустимо великим, значно виходить за прийнятну величину коефіцієнта запасу (рис. 4).

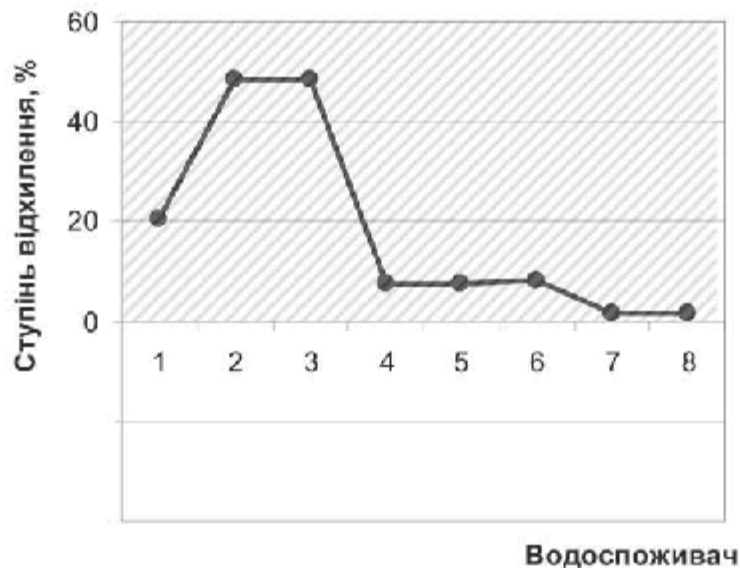


Рис. 4. Перевищення норм концентрації органічних речовин на вході процесів, що споживають воду, в результаті нанесення збурення.

Результати моделювання показують, що у випадку значних відхилень від стаціонарного режиму водоспоживання у одному з процесів при функціонуванні даної СВГ можливе суттєве порушення технологічного режиму у схемі. При цьому прийнятого значення коефіцієнта запасу виявляється недостатньо.

Моделний підхід дає змогу також визначити схеми водоспоживання, при проектуванні яких підхід на основі коефіцієнтів запасу може виявитися неефективним, і кінче необхідним є застосування засобів автоматизації процесу повторно-багаторазового водоспоживання. Очевидно, що для ухвалення подібного рішення потрібна апіорна інформація про можливі збурення у досліджуваних процесах водоспоживання. Такі апіорні дані можуть бути отримані, наприклад, з досвіду експлуатації аналогічних підприємств.

### Висновки

Значна частина потрібної для проектування СВГ інформації не підлягає регулярному контролю на підприємстві; наявні дані є подекуди неповними, неузгодженими, тощо. Тому підготування “якісної” вихідної інформації для розрахунку СВГ вимагає застосування специфічних методів збирання та статистичної обробки отриманих даних (для їх систематизації, дослідження достовірності і узгодженості, ідентифікації моделей).

Обґрунтування доцільності впровадження оптимізованих СВГ може бути здійснене відповідно до сценарійного підходу – багатоваріантного імітаційного моделювання СВГ (включно з насосами, трубопровідною арматурою, тощо) у нестаціонарних режимах роботи, із використанням пакетів універсальних моделюючих програм.

Успішне вирішення вказаних задач у комплексі з ефективною процедурою технологічного проектування СВГ покликане забезпечити створення надійних, оптимальних в економічному, екологічному та технологічному сенсі схем водного господарства промислових підприємств.

Серед перспектив наступних досліджень авторів слід назвати подальший аналіз шляхів збільшення точності розрахунків безпосередньо на етапі синтезу СВГ, зокрема, перспектив використання специфічних моделей процесів-водоспоживачів.

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Г. А. Статюха, А. М. Шахновский, Я. Ежовский\*, А. Ежовска\*, А. А.Квитка  
Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев  
e-mail: arcadyShakhn@mail.ru

\*Rzeszów University of Technology, Department of Chemical and Process Engineering, Poland,  
e-mail: ichjj@prz.edu.pl

*Работа посвящена некоторым практическим аспектам проектирования и промышленного внедрения схем водопотребления, водоочистки и водоотведения. В фокусе исследований: применение статистического анализа к изучению собранных на производстве исходных данных для модернизации схем водопотребления, а также основанная на модельном подходе оценка целесообразности внедрения схем водопотребления в эксплуатацию. Предложенные подходы могут быть применены на разных уровнях иерархии технологических схем водного хозяйства промышленного предприятия.*

*Ключевые слова: схема водопотребления, оптимизация, промышленное внедрение, подготовка данных, основанный на моделировании сценарий.*

## SOME ASPECTS OF DESIGNING INDUSTRIAL WATER NETWORKS

Statyukha G., Shakhnovsky A., Jeżowski J.\*, Jeżowska A.\*, Kvitka A.  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnical Institute", Kiev  
e-mail: ArcadyShakhn@mail.ru

\*Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland.  
e-mail:ichjj@prz.edu.pl

*The paper deals with some practical aspects of designing and implementing industrial water networks in process plants. The main issues addressed are: application of statistical analysis to the study of initial data collected at the plant for designing optimal water networks, simulation-based estimation of expediency of optimized water networks implementation. Methods developed are applicable for water usage networks with treatment processes, i.e. water networks with reuse and regeneration as well as wastewater treatment facilities.*

*Keywords: water usage network, optimization, industrial implementation, data treatment, simulation-based scenario.*

### Список літератури

1. Статюха Г.О. Моделирование схем промышленного водоснабжения на основе метода структурных параметров / Г.О. Статюха, О.О.Квитка, А. М. Шахновський // Экологические и ресурсосбережение. – 2003. – №5. – С. 57-62.
2. Статюха Г. А. Использование математических моделей процессов очистки для проектирования распределенных систем очистки сточных вод / [Г. А. Статюха, А. А. Квитка, Т. В. Бойко, И. Н. Джигирей]. // Химия и технология воды. – 2006. – № 6. – т. 28. – С. 517-530.
3. Shakhnovskij A. Optymalizacja sieci wody procesowej przy zastosowaniu programowania matematycznego / [A. Shakhnovskij, J. Jezowski, A. Kvitka, et al.]. // Inzynieria chemiczna i procesowa. – 2004. – 25. – P. 1607-1612.
4. Bagajewicz M. J. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants / M. J. Bagajewicz // Computers and chemical engineering. – 2000. – Vol. 34. – P. 2093- 2113.
5. Шахновський А. М. Проблема оптимальності в задачах синтезу схем промислового водоснабження / [А. М. Шахновський, Я. М. Єжовський, Г. О. Статюха, О. О. Квитка]. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2004. – №6. – С. 35-41



6. *Ерохин В. И.* Согласование материального баланса крупного нефтеперерабатывающего завода в условиях неполных данных / *В. И. Ерохин, А. Ю. Латтев, Н. В. Лисицын* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 2. – С. 130-140
7. *Бондарь А. Г., Статюха Г. А.* Планирование эксперимента в химической технологии. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
8. *Bagajewicz M.* On the probability distribution and reconciliation of process plant data / *M. Bagajewicz* // *Comput. Chem. Eng.* – 1996. – 20. – P. 813-819.
9. *Sanchez M.* Simultaneous estimation of biases and leak in process plants / [*M. Sanchez, J. Romagnoli, Q. Jiang, M. Bagajewicz*]. // *Comput. Chem. Eng.* – 1999. – 23. – P. 841-857.
10. *Soderstrom T. A.* A mixed integer optimization approach for simultaneous data reconciliation and identification of measurement bias / *T. A. Soderstrom, D. M. Himmelblau, T. F. Edgar* // *Control Engineering Practice*. – 2001. – 9. – P. 869-876.
11. *Bagajewicz M.* Stochastic-based accuracy of data reconciliation estimators for linear systems / *M. Bagajewicz, D. Q. Nguyen* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2008. – Vol. 32, #6. – P. 1257-1269.
12. *Suh M.H.* Robust optimal design of wastewater reuse network of plating processes / *M.H. Suh, T.Y. Lee* // *J Chem Eng Jpn.* – 2002. – 35. – P. 863-873.
13. *Tan R. R.* Synthesis of robust water reuse networks / *R. R. Tan, D. E. Cruz* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2004. – 28(12). – P. 2547 - 2551.
14. *Al-Redhwan S. A.* Wastewater minimization under uncertain operational conditions / *S. A. Al-Redhwan, B. D. Crittenden, H. M. S. Lababidi* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2005. – 29(5). – P. 1009-1021.
15. *Foo D. C. Y.* Correct identification of limiting water data for water network synthesis / *D. C. Y. Foo, Z. A. Manan, M. M. El-Halwagi* // *Clean Technologies and Environmental Policy*. – 2005. – 8(2). – P. 96-104.
16. *Tan R. R.* Assessing the sensitivity of water reuse network to noisy mass loads using monte carlo simulation / *R. R. Tan, D. C. Y. Foo, Z. A. Manan* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2007. – 31(10). – P. 1355-1363.
17. *Єжовська А.* Збирання та обробка вихідних даних для проектування технологічних схем водоспоживання та водовідведення / [*А. Єжовська, Я. Єжовський, О.О. Квітка та ін.*]. // Вісник Житомирського державного інженерно-технологічного університету. – 2007. – № 1 (40). – С. 213-218.
18. *Statyukha G.* A methodology for designing industrial water networks / [*G. Statyukha, A. Shakhnovsky, J. Jeżowski, et al*]. // *Chemical Engineering Transactions*. – 2009. – No 18. – P. 189-194
19. *Bagajewicz M. J.* On the appropriate architecture of the water/wastewater allocation problem in process plants / *M. J. Bagajewicz, D. C. Faria* // *Computer Aided Chemical Engineering*. 2009. – 26. – P. 1-20.
20. *Bagajewicz M.* Comparison of steady state and integral dynamic data reconciliation / *M. Bagajewicz, Q. Jiang* // *Computers & Chemical Engineering*. – 2000. – Vol. 24. – No 11. – P. 2367-2518.
21. *Jeżowski J.* Optimization of water usage networks – case study / [*J. Jeżowski, A. Shakhnovsky, A. Jeżowska, et al.*]. // *Computer Aided Process Engineering – current problems and trends*, Eds. Thullie J., Gierczycki A., Piotrowski K. – Gliwice, Poland, 2008. – P. 34-39.
22. *Zhen Zhang* Studies on resilience of water networks / *Zhen Zhang, Xiao Feng, Feng Qian* // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – V. 147. – P. 117-121
23. *Шахновський А.М.* Комп'ютерне моделювання процесів водоспоживання із використанням стимуляторів / [*А. М. Шахновський, А. Єжовська, О. О. Квітка, В. В. Янишпольський*]. // Вісник Черкаського державного технологічного університету – 2008. – №. 4. – С. 67-71.
24. *Bagajewicz M. J.* A robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants / *M. J. Bagajewicz, M. Rivas, M. J. Savelski* // *Computers and Chemical Engineering*. – 2000. – 24. – P. 1461-1466