

УДК 628.17:658.26:681.5

**А. М. Шахновський; Г. О. Статюха, д. т. н., проф.;**  
**О. О. Квітка, к. х. н., доц.; Я. Єжовський, д. т. н., проф.**

## **ДОСВІД ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ВОДОСПОЖИВАННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

*Представлено досвід проектування та модернізації технологічних схем водоспоживання промислових підприємств шляхом використання розробленого авторами програмно-алгоритмічного забезпечення. Розглянуто та проілюстровано прикладами особливості структурної оптимізації схем водоспоживання у різних галузях промисловості, а також підхід до експериментально-статистичної ідентифікації моделей одиниць водоспоживання у статистиці.*

### **Актуальність**

Проблема недостачі чистої води є надзвичайно важливою для нашої країни, що є однією із найбільш вододефіцитних країн у Європі. Так, сумарні запаси водних ресурсів України на душу населення в маловодні роки становлять, за різними оцінками, близько 1 тис. м<sup>3</sup>, що значно менше відповідних показників ряду інших країн (у Польщі сумарні запаси водних ресурсів оцінюються цифрою 1,72 тис. м<sup>3</sup>/рік, в Казахстані — 2 тис. м<sup>3</sup>/рік, в Швеції — 2,5 тис. м<sup>3</sup>/рік, в Португалії — 2,7 тис. м<sup>3</sup>/рік, у Росії — 31,0 тис. м<sup>3</sup>/рік тощо). Найбільшим споживачем води є промисловість, зокрема, хімічна галузь. Відомо, що на долю промисловості припадає сьогодні більш як 45 % загального водоспоживання [1, 2].

У зв'язку із зазначеним, важливою є також проблема промислових стічних вод, кількість яких зростає з ростом водоспоживання і вимагає витрат, що збільшуються, на експлуатацію очисних систем. Відомо, що значна частка стічних вод потрапляє до навколишнього середовища без належного очищення. Згідно з статистичними даними, частка неочищених (забруднених) стічних вод у 2004 році складала майже 40% від загальної кількості стічних вод, скинутих в цьому році у водні об'єкти України [2]. Таким чином, актуальною для нашої країни задачею як техноекологічної, так і з економічної, соціально-політичної точок зору є впровадження водозбережних технологій у водному господарстві промислового підприємства, застосування сучасних розробок щодо збереження водних джерел від забруднення і виснаження, застосування високоефективних методів знешкодження та знезаражування шкідливих домішок.

### **Аналіз останніх досліджень**

Розробка науково виправданих методів та засобів запобігання шкідливих впливів на водне середовище включає інтенсифікацію процесів застосування води на всіх етапах її життєвого циклу. Мова йде про підвищення ефективності як процесів очищення природних та стічних вод, так і процесів водоспоживання, як визначальної ланки водного господарства. Підвищення інтенсивності процесів очищення шляхом зменшення обсягів споживання свіжої води та, відповідно, зменшення обсягів утворення стічних вод, що надходять на очищення, досягається впровадженням науково обґрунтованих заходів щодо максимально повного використання води на підприємстві, оборотного водоспоживання.

Згадана проблема ставилася і вирішувалася в нашій країні лише як побічна при проектуванні даного конкретного підприємства. В результаті, заходи для зниження обсягів водоспоживання носять у літературі, як правило, характер вузькоспеціальних рекомендацій, що відносяться тільки до даного підприємства (групи підприємств). В літературі знаходимо досвід раціонального водогосподарювання в металургії [3, 4], нафтопереробці [5, 6], гальванічному виробництві [7, 8], целюлозно-паперовій та текстильній промисловості [5, 9], а також у виробництві аміаку [10], содовому виробництві [11] тощо. З наведених та інших подібних робіт видно, що оскільки принцип вибору того чи іншого мето-

ду водної економії важко формалізується, рішення, як правило, досить суб'єктивні, обґрунтовані практично тільки інженерним досвідом. Не відкидаючи важливості отриманих авторами результатів, слід зауважити, що емпіричний підхід не гарантує оптимального результату, і, отже, є необхідність в систематичній процедурі оптимізації водного господарства.

За оцінкою [1] показник повторно-оборотного водопостачання у вітчизняній промисловості на сьогоднішній день є досить високим (близько 84 %). Але його досягнуто в основному до 1990 року. В той же час, в промисловості наявні резерви зниження водомісткості продукції, а отже, і обсягів утворення стічних вод. За твердженням ряду авторів, в сучасній промисловості існує реальна технічна можливість доведення частки води багаторазового використання до 90–95 % [1, 3]. Узагальнюючи літературні дані, доцільно поділити заходи, що вживаються для оптимізації водного господарства існуючого промислового підприємства, на такі категорії:

1. Організаційні заходи, проведені за результатами аудиту водного господарства [12, 13]. Сюди можна віднести, зокрема:

- регулярну (щоденна, щотижнева, щомісячна) актуалізацію водного балансу підприємства і окремих його структурних підрозділів;
- розробку системи премій та стягнень за підтримання режиму водної економії;
- впровадження норм споживання води на виробничі, побутово-господарчі та інші потреби;
- встановлення лічильників води;
- усунення не планованих витоків води тощо.

Даний комплекс заходів є, вочевидь, необхідним та першочерговим, і сприяє підвищенню загальної культури виробництва. Але в більшості випадків при вирішенні проблеми водозбереження такі заходи є недостатніми. Потрібні принципові рішення щодо оптимізації водоспоживання.

2. Впровадження систематичних наукових та інженерних розробок, що мають на меті оптимізацію водного господарства підприємства. До даної категорії заходів відносяться [14, 15, 16]:

– параметрична оптимізація водного господарства. Економія води у випадку цієї групи заходів досягається за рахунок зміни параметрів функціонування чи заміни апаратів, що споживають воду, на інші. Пропонується, наприклад, заміна водяного охолодження технологічного обладнання повітряним, впровадження випарювального охолодження високотемпературного технологічного обладнання, використання газоповітряного охолодження технологічних розчинів замість водяного або вакуум-випарювального охолодження, ряд інших, специфічних для конкретного виробництва заходів. Основною особливістю таких заходів є необхідність значних капітальних вкладень;

– структурна оптимізація водного господарства. Тут задача оптимізації схем водоспоживання (СВС) розв'язується шляхом перерозподілу потоків води з метою повторно-багаторазового її використання. Вода повторного використання може циркулювати як в межах одного апарата, так і технологічної схеми в цілому, піддаючись у разі необхідності локальному очищенню.

### Постановка задачі

Метою даної роботи є аналіз досвіду авторів щодо розробки принципових технічних рішень для підвищення ефективності промислового водоспоживання, скорочення кількості стічних вод хіміко-технологічних схем шляхом впровадження повторно-багаторазового водопостачання на вітчизняних промислових об'єктах. У результаті попередніх досліджень [16, 17] найдоцільнішим при систематичній оптимізації структури СВС було визнано структурний підхід.

При цьому розділялися випадки проектування нового та модернізації наявного підприємства. Задача модернізації СВС є частковою; при цьому у випадку модернізації маємо можливість спростити процес проектування за рахунок використання додаткової апріорної інформації щодо схеми. Так, відомі заздалегідь технологічні одиниці, що споживають воду, в складі хіміко-технологічної системи, і визначення наявності чи відсутності апарата

та в схемі не є предметом оптимізації; в ряді випадків сталими заздалегідь заданими величинами є масові витрати води для одиниць водоспоживання тощо [17].

В роботі вжито процедуру структурної оптимізації СВС, що включає такі етапи [17, 18]:

1) Підготування вихідних даних. Збір даних передує переведенню задачі з технологічної в інформаційну площину. Складання матеріального балансу схеми ВС у необхідній для подальших розрахунків формі вимагає активного залучення у якості експертів інженерів виробництва, що модернізується. При цьому, як показує досвід авторів, частина шуканої інформації знаходиться поза широким вжитком на виробництві (зокрема, не всі з необхідних даних підлягають регулярному контролю).

2) Визначення критерію оптимізації (мінімальне споживання свіжої води) із застосуванням концептуального підходу.

3) Складання узагальненої схеми водоспоживання, що враховує всі варіанти перерозподілу потоків води.

4) Формулювання на основі узагальненої схеми задачі математичного програмування, та розв'язання цієї задачі.

5) Подання результатів розрахунків у зручній для інженера формі (у вигляді таблиць і схем).

Для розрахунків використовується спеціально розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення. Вхідними даними при цьому є характеристики балансової схеми водоспоживання [19]. Згаданий компонент може виступати складовою частиною пакета для проектування хіміко-технологічних схем (ХТС) та їх елементів «Екологія», розробленого на кафедрі кібернетики хіміко-технологічних процесів НТУУ «КПІ».

### **Застосування методології проектування схем водоспоживання на стадії проектування промислових об'єктів**

У якості модельної взято технологічну схему водоспоживання супутніх ділянок целюлозно-паперового виробництва [20, 21]. Традиційні хіміко-технологічні процеси целюлозно-паперового виробництва та виробництва штучних волокон звичайно включають три системи водоспоживання:

- виробничу;
- господарсько-питну;
- протипожежну.

Джерелами води для виробничої системи є відкриті водойми. У господарсько-питну і протипожежну системи вода подається питної якості з водопроводу населеного пункту або артезіанських свердловин.

Забруднення води відбувається в результаті переходу речовини (допоміжної або інгредієнта, що забруднює масу) з робочого (концентрованого) обробного розчину, яким просочена маса, у воду. У якості інтегральної характеристики забрудненості води прийнято хімічне споживання кисню.

Баланс водоспоживання включає десять одиниць водоспоживання (папероробні машини А та Б, процеси варки целюлози, біління, промивання волокон, промивання декелів, промивання циліндрів, мерсеризації, відварки, розшліхтовки). Витрата споживаної води для даної технологічної операції прийнята, виходячи з номінальної виробничої програми проектованого виробництва за об'ємом і співвідношенням виконуваних операцій з обробки сировини, а також величини загального об'єму водоспоживання підприємством на рівні 1000 м<sup>3</sup>/добу. Початкові значення показника ХСК на вході у відповідну технологічну операцію, і є рекомендованими величинами для води, використовуваної в технології.

Кінцеві значення концентрації (на виході з відповідної технологічної операції) оцінені за даними інвентаризації джерел відведення відпрацьованої технологічної води аналогічних виробництв.

Приймається припущення, що відстані між процесами є величинами одного порядку і впливають на витрати з транспортування води однаково.

Концептуальний пінч-аналіз СВС проведемо шляхом розв'язання задачі лінійного програмування [17]. В результаті оптимізації застосування процедури оптимізації до даної

задачі було знайдено мінімальне споживання свіжої води за формулою і положення точки піньч  $C^{ПІНЧ}$ :

$$f_{MIN} = 4992,5 \text{ м}^3/\text{год};$$

$$C^{ПІНЧ} = 5000 \text{ мг О}_2/\text{л}.$$

В подальшому значення  $f_{MIN}$  використано для перевірки досягнення глобального оптимуму шляхом побудови додаткового обмеження, при виконанні умови досягнення локального оптимуму.

Синтез оптимальної схеми водоспоживання зводимо до оптимізації узагальненої схеми СВС [16, 22]. Частка економії свіжої води оптимізованої схеми порівняно із вихідною складає 56,18 %. Із урахуванням коефіцієнта запасу (прийнятий на рівні 10 %), частка економії свіжої води у оптимізованій схемі має складати 50 %. Оскільки втрати води в технологічних процесах незначні, можна твердити, що обсяг стічних вод, що утворюються, також скоротився на 50 %. Очевидно, що така значна економія зумовлена насамперед наявністю у схемі одиниць із відносно «нежорсткими» вимогами до якості води.

### **Застосування методології проектування схем водоспоживання на стадії модернізації промислових об'єктів**

Як говорилося вище, з точки зору методики проектування оптимальних СВС, випадок модернізації промислових об'єктів є частковим. У [17] було показано, як цей факт може бути використаний для спрощення математичної моделі СВС до лінійного виду. Використання подібного роду робастної моделі робить необов'язковим попередній концептуальний аналіз технологічної схеми водоспоживання. Це значно зменшує обсяг обчислень при розрахунку оптимальної СВС.

У якості модельної взято технологічну схему водоспоживання ділянки фармацевтичного підприємства [23]. Для підприємства, що є об'єктом дослідження, проблеми раціонального використання є важливими і актуальними. В останні роки на підприємстві використовують новітні технології, що потребують додаткового використання питної води; вартість води неупинно зростає, причому тенденції щодо економного споживання попередні дослідження на підприємстві не виявили. Основний обсяг попередніх досліджень (вивчення стану водогосподарчої діяльності підприємства, визначення об'ємів споживання питної води об'єктами підприємства, тощо) було проведено силами спеціалістів підприємства. Ці дані увійшли до технічного завдання на оптимізацію водоспоживання ділянки виробництва.

За результатами обстежень водного господарства спеціалістами підприємства було запропоновано комплекс організаційних заходів. Подальший моніторинг стану водного господарства показав, що впровадження згаданих заходів дозволило зменшити загальний обсяг споживання питної води на 17 %, в тому числі, на технологічні потреби — на 19 %.

Ставилася задача вироблення рекомендацій щодо структурної оптимізації водоспоживання в рамках наступного етапу оптимізації водного господарства — впровадження систематичних наукових та інженерних розробок.

Найперспективнішим об'єктом для впровадження схеми повторно-багаторазового водоспоживання визнано ділянку «цех № 95 — тепловий пункт — цех № 94». На етапі підготовки даних визнано припустимим з технологічних міркувань об'єднання забруднювальних домішок, що присутні у воді даної СВС, у чотири групи, що описані такими характеристиками складу: завислі речовини, загальна жорсткість, хімічне споживання кисню, загальний солеміст. Граничні значення концентрацій на вході одиниць апаратів являють собою відомі з нормативної документації рекомендовані величини для вихідної технологічної води.

Параметричну ідентифікацію математичних моделей одиниць водоспоживання було здійснено експериментальним шляхом. Так, наприклад, при ідентифікації одного з параметрів математичної моделі автоматичних машин миття флаконів препарату А (масового навантаження по завислих речовинах) було вивчено 78 проб води. Одночасно

вимірювалося відповідне значення масової витрати води, що є важливим для визначення величини масового навантаження. Перевірка гіпотези про нормальний розподіл генеральної сукупності згаданої характеристики здійснювалася за критерієм згоди Колмогорова-Смирнова. Статистичні характеристики досліджуваної вибірки такі: об'єм вибірки  $n = 78$ ; вибіркоче середнє  $\bar{m} \approx 0,016$  мг/л; стандартне відхилення  $\sigma = 0,007$  мг/л. За результатами перевірки при рівні значимості  $q = 0,028$  гіпотеза про нормальний розподіл приймається. Отже, у якості оцінки величини масового навантаження може бути взяте вибіркоче середнє  $\bar{m}$  відповідних вимірів.

Всі апарати розміщено приблизно на одній позначці рівня. Відносна вартість повторного використання взята пропорційною відстані між апаратами. Для спрощення математичної моделі СВС апарати було конгломеровано за територіально-функціональною ознакою. Після умовного об'єднання утворилося шість одиниць водоспоживання (дві групи теплообмінних апаратів, установка одержання очищеної бідистильованої води — залишок після дистиляції, автоматичні миючі машини флаконів препаратів А та Б, котельна установка). Схема споживає водопровідну воду, характеристики якої відповідають існуючим нормативам, із урахуванням проведеного групування забруднювальних домішок.

Синтез оптимальної схеми водоспоживання було здійснено шляхом оптимізації відповідної надструктури. В результаті оптимізації водоспоживання даної технологічної схеми знизилося з 1025,6 м<sup>3</sup>/добу до 580,1 м<sup>3</sup>/добу. Таким чином, економія свіжої води в даному випадку складає 56,6 % (головним чином, за рахунок обладнання, що не відноситься до основної технології).

Авторами також запропоновано і впроваджено в дослідно-промислову експлуатацію схему раціонального водоспоживання ділянки хлібопікарського виробництва. За період експлуатації впровадженої схеми водоспоживання середньомісячна економія свіжої води склала 11 % від загального водоспоживання підприємства (включаючи економію за рахунок організаційних заходів).

### Висновки

Підсумовуючи, зазначимо, що використання структурних підходів до оптимізації СВС дозволяє зменшити споживання свіжої води технологічною схемою і, відповідно, обсяги утворення схемою рідких стоків як для випадку проектування нового, так і при модернізації існуючого підприємства.

Аналіз результатів розрахунку схем водоспоживання дозволяє стверджувати:

— наявність у системі великого числа технологічних одиниць, що споживають воду різної якості, сприяє перерозподілу потоків, і, отже, скороченню споживання свіжої води;

— існує можливість різко знизити водоспоживання схем, які містять апарати, що мало забруднюють воду;

— потенціал водної економії знижується з ростом числа груп забруднювальних домішок у системі через необхідність задовольняти вимоги до вхідної концентрації кількох забруднювачів одночасно;

— результатом розрахунків може бути кілька альтернативних варіантів структури технологічної схеми водоспоживання, з однаковими характеристиками, вибір найкращої з яких передбачає порівняльний аналіз вартості монтажу та експлуатації

Слід зазначити, що ряд галузей відрізняються особливо жорсткими вимогами до якості води, яка використовується у технології. В цих умовах особливості структурної оптимізації зумовлюють той факт, що велику частку в складі схем повторного використання мають процеси та обладнання допоміжного характеру. Можна бачити, що процеси та апарати основної технології виступають переважно джерелами, а не споживачами води повторного використання. У зв'язку із цим вимагає подальшого дослідження проблема чутливості оптимізованої ХТС до відхилень режиму функціонування ХТС від статичного (зокрема, мінімізація впливу згаданих відхилень на якість продукції та безпеку виробництва).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Водне господарство в Україні / Під ред. А. В. Яцика, В. М. Хорєва. — К.: Генеза, 2000. — 456 с.
2. Шашук В. А. Розвиток системи інтегрованого управління водними ресурсами України // Матеріали науково-практичних конференцій III Міжнародного Водного Форуму «АКВА Україна-2005». — С. 18—21.
3. Статюха Г. А., Бойко Т. В. Устойчивое экологически безопасное развитие: украинский контекст // Матеріали до семінару «Екологічна освіта та місцевий сталий розвиток». — К.: 2004 — С. 96—101
4. Особенности промышленного водоснабжения / Андоньев С. М., Жильцов В. М., Левин Г. М. и др.; Под ред. С. М. Андоньева. — К.: Будівельник, 1981. — 248 с.
5. Кутырин И. М. Охрана водных объектов от загрязнения. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 40 с.
6. Zbontar I., Glavič P. Total site: wastewater minimization. Wastewater reuse and regeneration reuse // Resources, Conservation and Recycling. — 2000. — 30. — P. 261—275.
7. Смирнов С. А., Запарий М. М. Обратное водопользование гальванического участка // Экология и промышленность России. — 2002. — № 2. — С. 20—22.
8. Крыщенко К. И., Дзегиленок В. Н. и др. Организация бессточных технологических процессов в гальваническом производстве // Экология и промышленность России. — 2003. — № 12. — С. 17—19.
9. Petek J., Glavič P. An integral approach to waste minimization in process industries // Resources, Conservation and Recycling. — 1996. — 17. — P. 169—188.
10. Колотыркин Я. М. Научные проблемы создания химико-технологических процессов и производств нового поколения // Хим. промышленность. — 1984. — № 10. — С. 579.
11. Зайцев И. Д., Ткач Г. А., Стоев Н. Д. Производство соды. — М.: Химия, 1986. — 312 с.
12. Липницький Д. В. Проблеми аналіза ресурсосбереження на підприємстві // Економічні проблеми і перспективи стабілізації економіки України: (Сб. науч. тр. докторантов, аспірантов і соискателей ІЭП НАН України). — Донецьк, 1997. — С. 236—239.
13. Азаренкова Г. М. Эффективность ресурсосбережения и ресурсопотребления в системе экологической безопасности Украины // Харьковский гос. ун-т. Вестник. — Х., 1997. — № 392: Регулируемая рыночная экономика: проблемы, закономерности развития, признаки. — С. 281—285.
14. Мараховский Л. Ф., Сухомлинов Б. П., Нат Т. П. Усовершенствование системы оборотного водоснабжения предприятия пищевой промышленности // Эксплуатация и ремонт зданий и сооружений городского хозяйства: Сб. науч. тр. — К., 1995. — С. 118—122.
15. Лисицын Н. В. Структурно-параметрическая оптимизация ХТС в задачах ресурсосбережения химической технологии // Химическая промышленность. — 2004. — № 4. — С. 192—198.
16. Шахновский А. М., Статюха Г. А., Квитка А. А. Структурная оптимизация схем промышленного водопотребления // Вісник Черкаського державного технологічного університету. — 2004. — № 3. — С. 149—153.
17. Шахновський А. М., Єжовський Я. М., Статюха Г. О., Квітка О. О. Проблема оптимальності в задачах синтезу схем промислового водоспоживання // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 6. — С. 35—41
18. Статюха Г. А., Квитка А. А., Єжовський Я., Шахновський А. М. Повышение эффективности схем промышленного водопотребления (на примере содовой промышленности) // Інтегровані технології та енергозбереження. — 2003. — № 3. — С. 57—65.
19. Шахновський А. М. До питання комплексного розрахунку технологічних схем водоспоживання та водоочищення // Вісник Технологічного університету Поділля. Ч.2. Технічні науки. — 2005 (друкується)
20. Нормы технологических процессов предприятий целлюлозно-бумажной промышленности ВНТП-08-86. Утв. Министерством лесной, целлюлозно-бумажной и деревообр. промышленности СССР 27.02.1986, приказ № 104
21. Примаков С. П., Барабаш В. А. Технологія паперу і картону: Навч. посібник. — К.: ЕКМО. — 2002. — 396 с.
22. Статюха Г. О., Квітка О. О., Шахновський А. М. Моделювання схем промислового водоспоживання на основі методу структурних параметрів // Екотехнологія і ресурсосбереження. — 2003. — № 5. — С. 57—62.
23. Shakhnovsky A., Jeżowski J., Statyukha G., Jeżowska A. An approach to water usage network retrofit design // Materials of International Workshop «Process integration and modelling chromatography processes». — Rzeszow-Boguchwala. — 2004. — P. 95—104.

**Шахновський Аркадій Маркусович** — старший викладач, **Статюха Геннадій Олександрович** — завідувач кафедри, **Квітка Олександр Олександрович** — доцент.

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»;

**Єжовський Яцек Марія** — професор кафедри хімічної та процесової інженерії.

Жешувський університет технології, Польща