

УДК 628.16:658.26:681.5

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ СХЕМ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА: СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД

Робота присвячена розробці методів підтримки проектних рішень при проектуванні технологічних схем водного господарства промислового підприємства: схем водоспоживання, водовідведення та водоочищення. Розроблено критерії оцінювання процедур структурної оптимізації схем водного господарства. У відповідності до вказаних критеріїв сформульовано математичне забезпечення для процедури проектування схем водного господарства. Випробування результатів дослідження здійснене на тестовій множині літературних прикладів

Ключові слова: схеми водного господарства, водоспоживання, водовідведення, очищення води, математичне програмування, пінч-аналіз

Робота посвячена разработке методов поддержки проектных решений при проектировании технологических схем водного хозяйства промышленного предприятия: схем водопотребления, водоотведения и водоочистки. Разработаны критерии оценки процедур структурной оптимизации схем водного хозяйства. В соответствии с указанными критериями сформулировано математическое обеспечение для процедуры проектирования схем водного хозяйства. Испытания результатов исследования осуществлено на тестовом множестве литературных примеров

Ключевые слова: схемы водного хозяйства, водопотребление, водоотведение, очистка воды, математическое программирование

І. С. Борзова*

E-mail: kxtp@list.ru

А. М. Шахновський

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: kxtp@list.ru

О. О. Квітка

Кандидат хімічних наук, доцент*

E-mail: kxtp@list.ru

*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів

Національний технічний університет
України "Київський політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Вагомий вплив на баланс водних ресурсів здійснює промисловість, зокрема хімічна галузь. Тому важко переоцінити роль оптимального проектування на стадії створення або модернізації схем водного господарства (СВГ) – схем водоспоживання і водовідведення (СВС) та схем очищення природних і стічних вод (СВО) як складової частини хіміко-технологічної системи (ХТС).

Водоохоронні заходи систематичного науково-інженерного характеру включають структурну і параметричну оптимізацію одиниць водоспоживання [1]. Під параметричною оптимізацією (ПО СВГ) розуміємо "покращення" параметрів функціонування складових СВГ – одиниць водоспоживання, або заміну останніх; під структурною оптимізацією (СО СВГ) – зміну структури потоків усередині СВС для "максимально повного" використання води у СВГ.

Порівняння згаданих видів оптимізації СВГ, у разі модернізації існуючого виробництва, дозволяє стверджувати, що ПО СВГ, безумовно, ефективна з точки зору економії води, може виявитися економічно менш вигідною, ніж СО СВГ, через технологічну складність і велику вартість необхідних для ПО СВГ заходів.

Методи оптимального технологічного проектування промислового підприємства останнім часом отримали значний розвиток. Різними науковими школами

розроблені і доведені до комп'ютерної реалізації процедури проектування різних підсистем СВГ.

Найбільш поширеним сьогодні є комбінаторний підхід на основі математичного програмування, що передбачає побудову та подальшу оптимізацію (спрощення) деякої узагальненої схеми СВС [1], [2]. Слід зауважити, що піонерська робота у досліджуваній області [2] пропонувала саме математичне програмування в якості базового підходу до проектування структур водного господарства. Однак через деякі складності застосування комбінаторного підходу (пов'язані насамперед з природою математичного опису, на якому даний підхід базується, з особливостями числового пошуку оптимуму задач математичного програмування [3]), у практиці проектування схем водного господарства тривалий час домінував концептуальний графоаналітичний підхід (пінч-методологія) [4]. Однак концептуальна парадигма проектування виявила суттєві обмеження, зумовлені її евристичним характером. Концептуальний підхід до проектування СВГ, на відміну від альтернативного йому комбінаторного підходу, досить складно формалізується, що створює суттєві перепони при реалізації вказаного концептуального підходу у вигляді програмного забезпечення.

В той же час, складнощі реалізації комбінаторного підходу у перспективі можуть бути нівельовані внаслідок поступу у галузі прикладної математики та підвищення потужності обчислювальної техніки. Так,

Таблиця 1

існують дослідження щодо заходів із подолання вказаних обчислювальних труднощів (локальні оптимуми, висока розмірність задачі, тощо) [3].

Комбінаторний підхід СО СВГ набув широкого поширення в практиці технологічного проектування ХТС. Зокрема, оригінальні формулювання задач математичного програмування та процедури СО СВГ на основі цих формулювань запропоновано у [5] (позначимо коротко вказаний підхід як «підхід А»), а також у [6] («підхід В»), у [7] («підхід С»), у [8] («підхід D»), у [9] («підхід Е»), у [10] («підхід F»), у [11] («підхід G»).

Внаслідок існування значної кількості підходів до СО СВГ, запропонованих різними дослідниками, вибір ефективної процедури (та відповідного прикладного програмного забезпечення) для потреб проектування є досить важким. Тому надзвичайно важливою є задача аналізу специфічних особливостей та дослідження ефективності найбільш поширених підходів до СО СВГ, що базуються на математичному програмуванні, що є метою представленої роботи.

2. Порівняння деяких поширених підходів до структурної оптимізації схем водного господарства

Запропоновані у літературі [5 – 11] підходи до СО СВГ об'єднує представлення задачі оптимізації СВГ (СВС та СВО) у якості задачі математичного програмування того чи іншого класу – задачі лінійного програмування (ЛП) або нелінійного програмування (НЛП), неперервного, дискретного нелінійного (ЗНДП) або лінійного програмування, задачі частково-дискретного програмування, тощо. Спільним у вказаних підходах є також використання цільової функції (технологічної або економічної природи) у якості «рушійної сили» процедури оптимізації, та системи обмежень на основі матеріальних балансів. Згадані обмеження мають на меті утримання результатів оптимізації в межах технологічної доцільності і припустимості. Результатами оптимізації у різних підходах є ті чи інші параметри, що визначають структуру СВГ: коефіцієнти структурного розділення потоків або значення витрат потоків СВГ.

Крім вказаних характеристик, підходи А-Г [5 – 11] у представленому дослідженні було порівняно за можливістю впровадження різних типів повторного використання води (без часткового очищення забрудненої води, з частковим очищенням забрудненої води, з виходу водоспоживача (ВС) безпосередньо на вхід того ж водоспоживача – рецикл); за наявністю (у явному вигляді) значень витрат та якості стічної води, що полишає виробничий майданчик (надходить на очищення «в кінці труби»). Бралися до розгляду також вимоги до вихідних даних для розрахунку СВГ: можливість врахування втрат води, врахування декількох зовнішніх джерел свіжої води (за номінальними обсягами водопостачання та якістю води), зафіксовані заздалегідь чи змінні значення номінальних витрат води для кожного ВС. Насамкінець, процедури оптимізації порівнювалися за типом цільової функції та можливістю зменшення кількості взаємозв'язків (трубопроводів для передачі води повторного використання). Результати порівняння представлено у табл. 1.

Порівняння процедур структурної оптимізації схем водного господарства

Підхід / Характеристика	А	В	С	D	Е	F	G
1. Врахування процесів часткового очищення	-	+	+	+	+	-	-
2. Клас задачі математичного програмування	ЗНЛП	ЗНЛП або ЗНДП	ЗНЛП	ЗНЛП або ЗНДП	ЗНЛП або ЗНДП	ЗНЛП	ЗНЛП
3. Можливість часткового очищення забрудненої води	-	+	+	+	+	-	-
4. Можливість рециклу	+	-	-	+	+	-	-
5. Врахування значень витрат води, що полишає виробничий майданчик	-	+	+	+	+	+	+
6. Врахування якості води, що полишає виробничий майданчик	-	+	-	-	+	-	+
7. Необхідність фіксованої витрати води для кожного водоспоживача	+	-	-	-	+	+	+
8. Врахування втрат води	+	-	-	-	-	+	+
9. Врахування декількох джерел води	+	-	+	-	-	+	-
10. Цільова функція має технологічний сенс	+	+	+	-	+	+	+
11. Цільова функція має економічний сенс	-	-	+	+	+	+	-
12. Можливість мінімізації кількості взаємозв'язків	-	+	-	-	+	-	-

Як видно з табл. 1, у низці досліджених підходів не передбачено врахування втрат води в процесі водоспоживання, випадку з декількома джерелами свіжої води з обмеженням її якості та обсягів водоспоживання. Не позбавлена суттєвих недоліків також процедура СО СВГ [1, 5], яка була розроблена і нині використовується для практичних потреб авторами цього дослідження.

Так, дана процедура передбачає оптимізацію фіксованої витрати води на вході водоспоживачів, що принципово важливо при модернізації СВГ, але обмежує універсальність підходу.

Узагальнюючи, можна виділити, зокрема, такі основні недоліки запропонованих підходів до СО СВГ:

- неможливість врахування процесів часткового очищення;
- відсутність (у явному вигляді) характеристик води, що полишає виробничий майданчик (надходить на очищення «в кінці труби»);
- неможливість врахування втрат води в процесі водоспоживання та водоочищення;
- необхідність фіксованої витрати води на вході водоспоживача (при проектуванні СВГ для потреб нового виробництва);

- неможливість врахування декількох зовнішніх джерел свіжої води та їх характеристик;
- неможливість мінімізації кількості взаємозв'язків між процесами (для скорочення витрат на впровадження та експлуатацію оптимізованої СВГ).

3. Збільшення ефективності процедур структурної оптимізації схем водного господарства

Як показано вище, збільшення ефективності вказаних процедур ПО СВГ може бути здійснене у напрямі врахування часткового очищення води в схемі, типу повторного використання, тощо.

За результатами представленого вище порівняння, для подальших розрахунків щодо збільшення ефективності було обрано процедуру структурної оптимізації СВГ з [6], яка може бути визнана найбільш універсальною з розглянутих (призначена для оптимізації СВГ з частковим очищенням потоків води, з врахуванням взаємного впливу між процесами, витрат частково очищеної води та масового навантаження забруднювача на процес очищення на етапі проектування).

Як інші подібні процедури, дана процедура СО СВГ базується на надструктурному принципі. На рис. 1 представлено елемент надструктури (узагальненої схеми), що включає процес-водоспоживач і процес часткового очищення води, та передбачає всі можливі можливості повторного використання води.

Представлена на рис. 1 узагальнена схема відрізняється видом структурних параметрів, які представлені у виді абсолютних величин. Нульові значення окремих з них свідчать про відсутність відповідного потоку, ненульові являють собою відповідні величини витрат.

Використана у цьому дослідженні задача оптимізації базується на запропонованій у [6] і має вигляд:

$$\text{Min1} \quad \sum_{d \in D} \sum_{j \in \Pi} B_{d,j}^{CB}, \quad (1)$$

$$\forall j: \sum_{d \in D} B_{d,j}^{CB} + \sum_{i \in \Pi} B_{i,j} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих} = B_j^{CT} + \sum_{k \in \Pi} B_{j,k} + \sum_{Rt \in O} B_{j,Rt}^{O_Вх} + B_j^{Br}, \quad (2)$$

$$i \neq j \quad k \neq j$$

$$\forall j: \sum_{d \in D} B_{d,j}^{CB} + \sum_{i \in \Pi} B_{i,j} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих} = B_j^{Вит}, \quad (3)$$

$$i \neq j$$

$$\forall j: B_j^{Вит} \leq B_j^{Вит_Макс}, \quad (4)$$

$$\forall j: B_j^{Вит} \geq B_j^{Вит_Мин}, \quad (5)$$

$$\forall j,s: \sum_{d \in D} (B_{d,j}^{CB} \cdot K_{d,s}^{CB}) + \sum_{i \in \Pi} (B_{i,j} \cdot K_{i,s}^{Вих}) + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих} \cdot K_{Rt,s}^{Вих} = (\sum_{d \in D} B_{d,j}^{CB} + \sum_{i \in \Pi} B_{i,j} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих}) \cdot K_{j,s}^{Bx}, \quad (6)$$

$$i \neq j \quad k \neq j$$

$$\forall j,s: (\sum_{d \in D} B_{d,j}^{CB} + \sum_{i \in \Pi} B_{i,j} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих}) \cdot K_{j,s}^{Bx} + M_{j,s} = (\sum_{d \in D} B_{d,j}^{CB} + \sum_{i \in \Pi} B_{i,j} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt,j}^{O_Вих}) \cdot K_{j,s}^{Вих}, \quad (7)$$

$$i \neq j \quad i \neq j$$

$$\forall j,s: K_{j,s}^{Bx} \leq K_{j,s}^{Bx,Макс}, \quad (8)$$

$$\forall j,s: K_{j,s}^{Вих} \leq K_{j,s}^{Вих,Макс}, \quad (9)$$

$$\forall Rt: \sum_{j \in \Pi} B_{j,Rt}^{O_Вх} + \sum_{Rm \in O} B_{Rm,Rt} = \sum_{j \in \Pi} B_{Rt,j}^{O_Вих} + \sum_{Rn \in O} B_{Rt,Rn} + B_{Rt}^{CT}, \quad (10)$$

$$Rt \neq Rm \quad Rt \neq Rn$$

$$\forall Rt,s: \sum_{j \in \Pi} B_{j,Rt}^{O_Вх} \cdot K_{j,s}^{Вих} + \sum_{Rm \in O} B_{Rm,Rt} \cdot K_{Rm,s}^{Вих} = (\sum_{j \in \Pi} B_{j,Rt}^{O_Вх} + \sum_{Rm \in O} B_{Rm,Rt}) \cdot K_{Rt,s}^{Bx}, \quad (11)$$

$$Rt \neq Rm \quad Rt \neq Rm$$

$$\forall s: \sum_{j \in \Pi} B_j^{CT} \cdot K_{j,s}^{Вих} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt}^{CT} \cdot K_{Rt,s}^{Вих} = (\sum_{j \in \Pi} B_j^{CT} + \sum_{Rt \in O} B_{Rt}^{CT}) \cdot K_s^{CT}, \quad (12)$$

$$K_s^{CT} \leq K_s^{CT,Макс}, \quad (13)$$

$$\forall Rt,s: K_{Rt,s}^{Вих} = K_{Rt0,s}^{Вих}, \quad (14)$$

$$\forall Rt,s: BB_{Rt,s} = \frac{K_{Rt,s}^{Bx} - K_{Rt,s}^{Вих}}{K_{Rt,s}^{Bx}}, \quad (15)$$

$$\forall Rt,s: BB_{Rt,s} = B_{Rt0,s}, \quad (16)$$

$$\forall Rt,s: K_{Rt,s}^{Вих} \leq K_{Rt,s}^{Вих,a}, \quad (17)$$

$$\forall Rt,s: K_{Rt,s}^{Bx} \leq K_{Rt,s}^{Bx,a}, \quad (18)$$

$$\text{Min2} \quad \sum_{Rt \in O} (\lambda_{Rt} \cdot \sum_{j \in \Pi} B_{Rt,j}^{O_Вих}), \quad (19)$$

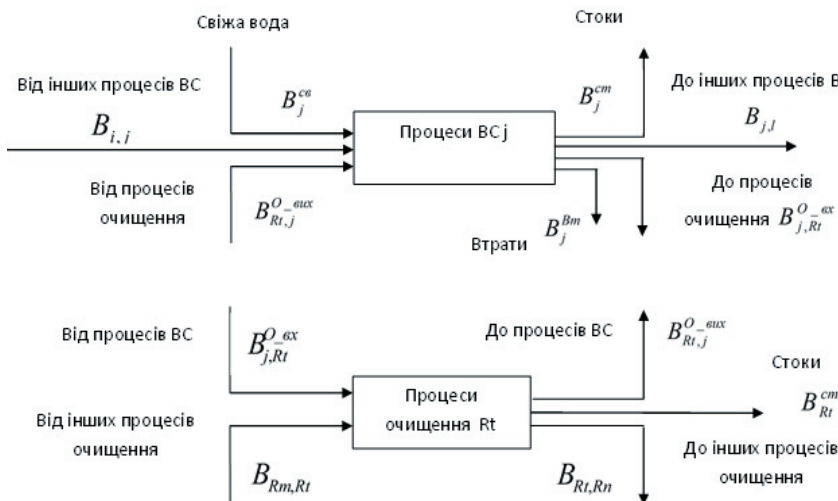


Рис. 1. Узагальнена схема типового ВС і типового процесу часткового очищення води СВГ

$$\text{Min3} \sum_{Rt \in O} \left(\sum_{j \in \Pi} B_{Rt,j}^{O_Bx} \cdot \sum_{j \in \Pi} ((K_{Rt,s}^{Bx} - K_{Rt,s}^{Bx}) \cdot \lambda_{Rt,s} \right), \quad (20)$$

$$\text{Min4} \sum_{j \in \Pi} \sum_{i \in \Pi} y_{i,j} + \sum_{Rt \in O} \sum_{j \in \Pi} y_{Rt,j}^{O_Bx} + \sum_{j \in \Pi} \sum_{Rt \in O} y_{j,Rt}^{O_Bx} + \sum_{Rm \in O} \sum_{Rt \in O} y_{Rm,Rt}^O + \sum_{j \in \Pi} y_j^{ct} + \sum_{Rt \in O} y_{Rt}^{O_ct}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \forall i, j: & B_{i,j} - y_{i,j} \cdot U \leq 0 \quad j \in \Pi, i \in \Pi, i \neq j \\ \forall Rt, j: & B_{Rt,j}^{O_Bx} - y_{Rt,j}^{O_Bx} \cdot U \leq 0 \quad Rt \in O, j \in \Pi \\ \forall j, Rt: & B_{j,Rt}^{O_Bx} - y_{j,Rt}^{O_Bx} \cdot U \leq 0 \quad j \in \Pi, Rt \in O \\ \forall Rm, Rt: & B_{Rm,Rt}^O - y_{Rm,Rt}^O \cdot U \leq 0 \quad Rm \in O, Rt \in O, Rm \neq Rt \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \forall Rt: & B_{Rt}^{ct} - y_{Rt}^{O_ct} \cdot U \leq 0, \quad Rt \in O \\ \forall j: & B_j^{ct} - y_j^{ct} \cdot U \leq 0, \quad j \in \Pi. \end{aligned} \quad (23)$$

де K – множина забруднювачів; K_s^{ct} – концентрація забруднювача s в стічній воді; $K_s^{ct_Max}$ – ГДК забруднювача s в стічній воді; $K_{j,s}^{Bx}$ – концентрація забруднювача s на вході процесу ВС j ; $K_{j,s}^{Bx}$ – концентрація забруднювача s на виході з процесу ВС j ; $K_{j,s}^{Bx,Max}$ – гранична концентрація забруднювача s на вході процесу ВС j ; $K_{j,s}^{Bx,Max}$ – гранична концентрація забруднювача s на виході з процесу ВС j ; $K_{Rt,s}^{Bx}$ – концентрація забруднювача s на вході одиниці очищення Rt ; $K_{Rt,s}^{Bx}$ – концентрація забруднювача s на виході з одиниці очищення Rt ; $K_{Rt,s}^{Bx}$ – фіксована концентрація забруднювача s на виході з одиниці очищення Rt ; $K_{Rt,s}^{Bx,a}$ – гранична концентрація забруднювача s на вході одиниці очищення Rt ; $K_{Rt,s}^{Bx,a}$ – гранична концентрація забруднювача s на виході з одиниці очищення Rt ; $K_{Rt,s}^{Bx,opt}$ – оптимальна концентрація забруднювача s на вході одиниці очищення Rt ; $K_{d,s}^{cb}$ – концентрація забруднювача s у свіжій воді з джерела свіжої води d ; V – множина значень витрат води; $V_{i,j}$ – витрата відпрацьованої води на виході з процесу ВС i на вхід процесу ВС j ; V_j^{ct} – витрата стічної води на виході з процесу ВС j ; V_j^{cb} – витрата свіжої води на вході процесу ВС j ; $V_{j,l}$ – витрата відпрацьованої води на виході з процесу ВС j на вхід процесу ВС l ; $V_{j,Rt}^{O_Bx}$ – витрата відпрацьованої (забрудненої) води на виході з процесу ВС j на вхід одиниці очищення Rt ; $V_{Rt,j}^{O_Bx}$ – витрата частково очищеної води на виході з одиниці очищення Rt на вхід процесу ВС j ; $V_{Rm,Rt}$ – витрата частково очищеної води на виході з одиниці очищення Rm на вхід одиниці очищення Rt ; $V_{Rt,Rn}$ – витрата частково очищеної води на виході з одиниці очищення Rt на вхід одиниці очищення Rn ; V_{Rt}^{ct} – витрата стічної води на виході з одиниці очищення Rt ; $V_{d,j}^{ct}$ – витрата свіжої води на вході процесу ВС j від джерела свіжої води d ; V_j^{Btp} – втрати води в процесі j ; V_j^{Btp} – витрата води на вході процесу ВС j ; $V_j^{Btp_Max}$ – гранична витрата води на вході процесу ВС j ; $V_j^{Btp_Min}$ – гранична витрата води на вході процесу ВС j ; $M_{j,s}$ – масове навантаження забруднювача s для видалення з одиниці очищення Rt ; Π – множина процесів ВС; BB_{Rt} – коефіцієнт видалення забруднювача s з одиниці очищення Rt ; $BB_{Rt,s}$ – поточний коефіцієнт видалення забруднювача s з одиниці очищення Rt ; O – множина одиниць очищення; D – множина джерел свіжої води; Z – множина потоків стічної води; U – коефіцієнт, величина якого більша за будь-яку витрату води між двома процесами; $y_{i,j}$ – потік від процесу ВС i до процесу ВС j ; $y_{Rt,j}^{O_Bx}$ – потік від одиниці очищення Rt до процесу ВС j ; $y_{j,Rt}^{O_Bx}$ – потік від процесу ВС j до одиниці

очищення Rt ; $y_{Rm,Rt}^O$ – потік від одиниці очищення Rm до одиниці очищення Rt ; $y_{Rt}^{O_ct}$ – потік стічної води від одиниці очищення Rt ; y_j^{ct} – потік стічної води від процесу ВС; λ_{Rt} – ваговий коефіцієнт одиниці очищення Rt ; $\lambda_{Rt,s}$ – ваговий коефіцієнт забруднювача s в одиниці очищення Rt .

У задачі математичного програмування (1)-(23) залежності (6)-(12), (14)-(20) та (22) належать оригінальній публікації [6], в той час як залежності (1)-(5), (13), (21), та (23) додано для збільшення ефективності процедури ПО СВГ.

Приклади

В рамках представленого дослідження було проаналізовано за вищенаведеними характеристиками ефективності (врахування процесів часткового очищення, врахування втрат води в процесі водоспоживання та водоочищення, врахування декількох зовнішніх джерел свіжої води та їх характеристик, можливість мінімізації кількості взаємозв'язків між процесами, тощо) множину з 18 літературних прикладів. Розрахунок вказаних тестових прикладів із використанням представленої вище методології дав результати кращі (або не гірші), ніж еталонні результати з відповідних літературних джерел. Проілюструємо представлену вище процедуру СО СВГ найбільш характерними прикладами.

Приклад 1

У табл. 2 представлено експлуатаційні дані для процесів ВС [12].

Таблиця 2

Баланс водоспоживання для прикладу 1

Процес	$K_{j,s}^{Bx}$ (мг/кг)	$K_{j,s}^{Bx}$ (мг/кг)	Масове навантаження (г/год)	Гранична витрата води/втрати, т/год
1	25	80	2000	36.36
2	25	90	2880	44.31
3	25	200	4000	22.86
4	50	100	3000	60
5	50	800	30000	40
6	400	800	5000	12.5
7	400	600	2000	10
8	0	100	1000	10
9	50	300	20000	80
10	150	300	6500	43.33
Разом:				359.36

Концентрація забруднювача на виході з одиниці часткового очищення $K_{Rt,s}^{O_Bx} = 5$ мг/кг. Синтез оптимальної СВГ було здійснено на основі залежностей (1)-(23). Задача оптимізації включає в себе 75 обмежень, 20 з яких є нелінійними. Для рішення зазначеної задачі нелінійного програмування було застосовано КПЗ LINGO 9.0. компанії LINDO Systems Inc.

В оптимізованій схемі водоспоживання (рис. 2) витрата свіжої води складає 10 т/день, що в порівнянні з вихідною прямою схемою дає в даному випадку 97.22% економії.

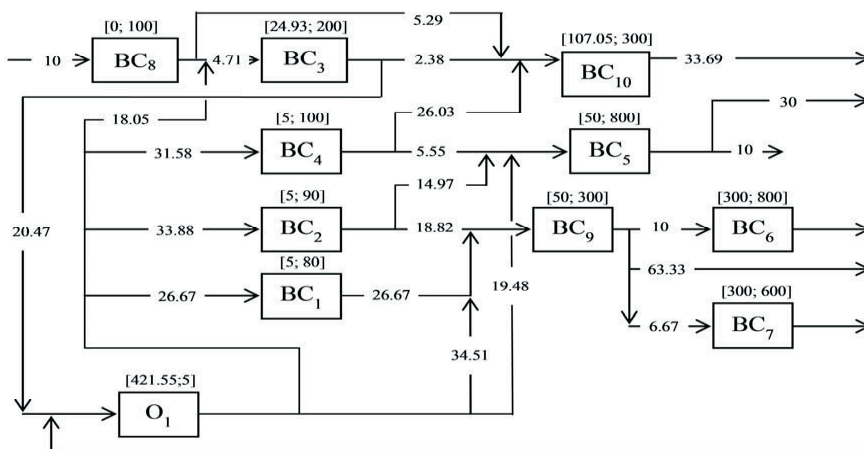


Рис. 2. Оптимальна схема ВС для прикладу 1

Порівняємо результати оптимізації з результатами з застосуванням інших методологій оптимізації (табл. 3).

Таблиця 3

Порівняння результатів оптимізації по результатам застосування методологій

Підхід	Показники	Мінімальне споживання свіжої води (тон/год)	Мінімальна витрата води в пр. очищення (тон/год)	Оптимальна концентрація регенерації (мг/л)	Кількість взаємозв'язків
Пропонований підхід		10	164.15	421.57	23
Підхід з [12]		10	164.15	423.60	26

Приклад 2

У табл. 4 представлено експлуатаційні дані для процесів ВС [6, 13, 14].

Таблиця 4

Баланс водоспоживання для прикладу 2

Процес	Забруднювачі	$K^{Вх}_{j,s}$ (мг/л)	$K^{Вих}_{j,s}$ (мг/л)	Масове навантаження (г/год)	Гранична/мін. витрата води/свіжої (т/год)
BC ₁	A	0	15	750	50/50
	B	0	400	20000	
	C	0	35	1750	
BC ₂	A	20	120	3400	34/33.19
	B	300	12500	414800	
	C	45	180	4590	
BC ₃	A	120	220	5600	56/54.82
	B	20	45	1400	
	C	200	9500	520800	
BC ₄	A	0	20	160	8/8
	B	0	60	480	
	C	0	20	160	
BC ₅	A	50	150	800	8/7.6
	B	400	8000	60800	
	C	60	120	480	
Разом:					156/153.9

Задача складається з п'яти процесів з фіксованими значеннями витрати води і трьох одиниць очищення з трьома забруднювачами.

Параметри одиниць очищення представлені в табл. 5.

Гранично припустимі концентрації для забруднювачів А, В, С в стічній воді складають відповідно $K^{ст_Макс} = 20, 5, 100$ мг/л.

Таблиця 5

Представлення одиниць очищення у вигляді відношень видалення та затрат на очищення

Операції	Відношення видалення			Затрати на процес регенерації	
	A	B	C	Інвестиційний коефіцієнт витрат (грн)	Коефіцієнт експлуатаційних витрат (грн./м ³)
O ₁	0	0.999	0	16800	1
O ₂	0.7	0.9	0.98	12600	0.0067
O ₃	0.95	0	0.5	4800	0

Синтез оптимальної СВГ було здійснено на основі залежностей (1)-(23). Задача оптимізації включає в себе 110 обмежень, 30 з яких є нелінійними. Для рішення зазначеної задачі нелінійного програмування було застосовано КПЗ LINGO 9.0.

В оптимізованій схемі водоспоживання (рис. 3) витрата свіжої води складає 58 т/день, що в порівнянні з вихідною прямою схемою дає в даному випадку 62.24 % економії.

Мінімальна витрата води в процесі очищення: $58.63 + 55.6 + 46.46 = 160.69$ (тон/год).

Порівняємо результати оптимізації з результатами з застосуванням інших підходів – табл. 6.

Таблиця 6

Порівняння результатів оптимізації по результатам застосування різних підходів

Підхід	Показники	Мінімальне споживання свіжої води (тон/год)	Мінімальна витрата води в процесі очищення (тон/год)	Вартість (грн/рік)	Кількість взаємозв'язків
Пропонований підхід		58	160.69	598958.8	16
O ₁			58.63		
			55.6		
			46.46		
Підхід з [14]		59.7	176.3	610539.7	15
O ₁			56.9		
			59.7		
			59.7		

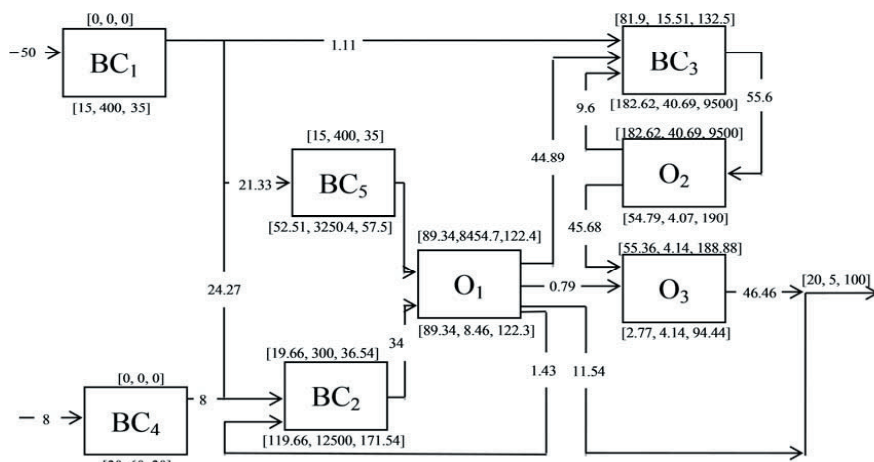


Рис. 3. Оптимальна схема ВС для прикладу 2

4. Висновки

Виділені у даному дослідженні типові характеристики процедур параметричного проектування схем

водного господарства промислових підприємств є спробою об'єктивної оцінки ефективності даних процедур. Запропонований у роботі математичний опис та процедура СО СВГ на його основі відповідають багатьом з даних характеристик, що підтверджують наведені ілюстративні приклади.

Зазначимо, що у залежності від потреб конкретної СВГ із системи обмежень можуть бути виключені ті обмеження, що є неактуальними у даному конкретному випадку (наприклад, при відсутності вагомих втрат у досліджуваних процесах водоспоживання та водоочищення, при неможливості реалізації часткового очищення води, тощо). При цьому досі вимагає вирішення задача формалізації процесу складання математичного опису під конкретну прикладну задачу.

Література

1. Шахновский А. М. Структурная оптимизация схем промышленного водопотребления [Текст] / А.М. Шахновский, Г. А. Статюха, А. А. Квитка // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2004. – №3. – С. 149-153.
2. Takama N. Optimal water allocation in a petroleum refinery [Текст] / N. Takama, T. Kuriyama, K. Shiroko, T. Umeda // Computers & Chemical Engineering. – 1980. – Т. 4, №4. – С. 251 – 258.
3. Шахновський А. М. Проблема оптимальності в задачах синтезу схем промислового водоспоживання [Текст] / А. М. Шахновський, Я. М. Єжовський, Г. О. Статюха, О. О.Квітка // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2004. – №6. – С. 35-41.
4. Wang, Y. P. Wastewater minimization [Текст] / Y. P. Wang, R. Smith // Chem Eng Sci. – 1994. – Т. 49, №7. – С. 981-1006.
5. Статюха, Г.О. Моделювання схем промислового водоспоживання на основі методу структурних параметрів [Текст] / Г. О. Статюха, О. О. Квітка, А. М. Шахновський // Экологические и ресурсосбережение. – 2003. – №5. – С. 57-62.
6. Feng, X. Grass-roots design of regeneration recycling water networks [Текст] / X. Feng, J. Bai, H. Wang, X. Zheng // Computers & Chemical Engineering. – 2008. – Т. 32, №8. – С. 1892-1907.
7. Faria, D. C. Optimization of water networks in industrial processes [Текст] / D. C. Faria, A. Souza, S. M. Arruda, G. U. Souza // Journal of Cleaner Production. – 2009. – Т.17. – С. 857–862.
8. Matijasevic, L. A water network optimization using MATLAB-A case study [Текст] / L. Matijasevic, I. Dejanovic, D. Spojka // Resources, Conservation and Recycling. – 2010. – Т. 54. – С. 1362–1367.
9. Koppol, A. On zero water discharge solutions in the process industry [Текст] / M. Bagajewicz, B. Dericks, M. Savelski // Advances in Environmental Research. – 2003. – Т. 8.– С. 151-171.
10. Lim, S. Analysis of effects of an objective function on environmental and economic performance of a water network system using life cycle assessment and life cycle costing methods [Текст] / S. R. Lim, D. Park, J. M. Park // Chemical Engineering Journal. – 2008. – Т. 144. – С. 368–378.
11. Tiana, J. R. A process integration approach to industrial water conservation: A case study for a Chinese steel plant [Текст] / J. R. Tiana, P. J. Zhou, B. Lv // Journal of Environmental Management. – 2008. – Т. 86. – С. 682–687.
12. Savelski, M. On the use of linear models for the design of water utilization systems in refineries and process plants [Текст] / M. Savelski, M. Bagajewicz // Annual American Institute of Chemical Engineering meeting. Dallas. Chemical Engineering Research & Design. – 2000. – submitted.
13. Kuo, W.-C. J. Designing for the interactions between water-use and effluent treatment [Текст] / W.-C. J. Kuo, R. Smith // Transactions of International Chemical Engineering. Part A. 1998. – № 76. – С. 287–301.
14. Gunaratnam, M. Automated design of total water systems. [Текст] / M. Gunaratnam, A. Alva-Argaez, A. Kokossis, J.-K. Kim, R. Smith // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2005 – Т. 44 – С. 588–599.