

УДК 66.011: 519.853

І. М. Джигирей, асп.;

О. О. Квітка, к. х. н., доц.

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЛІНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ СХЕМ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Запропоновано методику синтезу розподілених систем очищення стічних вод, розроблену на основі концептуальних методів і нелінійного програмування з використанням математичних моделей процесів очищення, що дозволяє проводити розрахунок нових та модернізацію вже існуючих очисних систем. Загальна структура схеми очищення описується за допомогою коефіцієнтів розподілу потоків. Показано, що розподілені очисні схеми мають ряд переваг у порівнянні з існуючими системами каналізування стічних вод промислових підприємств.*

### Актуальність

Одним із найважливіших питань у проектуванні промислових виробництв є вибір оптимальної у розумінні вартості схеми очищення. Пошук оптимального варіанту розділення і об'єднання потоків стічних вод під час проектування системи каналізування підприємства є актуальним питанням, від правильної відповіді на яке залежать кошторисна вартість будівництва і витрати на експлуатацію очисних споруд. Оптимальний розподіл водних потоків у схемі очищення дозволяє зменшити об'єм стічних вод, що обробляються, і підвищити концентрацію забруднювачів на вході у процеси очищення [1]. Це приводить до інтенсифікації процесів і зменшення витрат на підтримку роботи системи очищення стічних вод.

### Аналіз останніх досліджень

У 1989 році була запропонована задача синтезу і оптимізації масообмінних мереж, де було використано принципи синтезу теплообмінних схем [2]. Масообмінні процеси були представлені у вигляді зведених кривих водних потоків у системі. Ідею зображення задачі синтезу розподілених схем за допомогою зведених кривих використали Wang і Smith для розробки т. з. «водного пінч-аналізу» схем очищення стічних вод [3]. Процедура синтезу систем очищення, що базується на пінч-аналізі і термодинамічному підході [4], відноситься до концептуального напрямку і є досить потужною. Недолік концептуальних методів полягає у тому, що отриманий результат не можна назвати оптимальним з математичної точки зору [5]. Цей недолік відсутній у роботах іншого напрямку моделювання систем очищення стічних вод — математичному програмуванні. Galan і Grossmann розробили моделі неопуклого нелінійного і цілочисельного нелінійного програмування для синтезу схем очищення на основі узагальненої технологічної схеми у вигляді вузлів змішування і розділення [6]. Узагальнену технологічну схему з вузлами змішування та розділення для моделювання схем очищення використовували також Alva-Argaez та ін. [7] і Huang та ін. [8]. Castro та ін. запропонували модель нелінійного програмування (НЛП), змінними у якій є витрати стічних вод у процесах очищення та концентрація забруднювачів на вході і виході з процесів [9]. Методика базується на розв'язку задач ЛП і НЛП, включає аналіз усіх можливих послідовностей процесів очищення.

### Невирішені частини загальної проблеми

Основною проблемою у розв'язанні задач математичного програмування залишається застря-

вання у локальних оптимумах, що є наслідком неопуклості цільової функції. Опис узагальненої технологічної схеми за допомогою вузлів змішування та розділення приводить до появи великої кількості змінних, що у свою чергу, з урахуванням вищевказаного, вимагає використання комерційних пакетів з оптимізації для розв'язку задачі, наприклад GAMS [6, 8, 7, 9]. Використання лише концептуальних методів є досить ефективним, але результат не є оптимальним з математичної точки зору [10]. Крім того жодна з методик, як концептуальних, так і тих, що базуються на математичному програмуванні, не дозволяють врахувати втрати води у схемі очищення і залежність ефективності процесів очищення від концентрації забруднювальних речовин та витрати потоку, що очищається.

У роботі запропоновано методику проектування розподілених схем очищення стічних вод, розроблену на основі концептуальних методів інтеграції процесів та математичного програмування з використанням моделей процесів очищення, що дозволяє проводити розрахунок нових та модернізацію вже існуючих очисних систем.

### Постановка задачі

Задача синтезу оптимально розподіленої схеми очищення є задачею мінімізації цільової функції, яка є сумою витрат стічних вод у процесах очищення, з урахуванням обмежень, накладених на процеси, їх послідовність і розташування, при виконанні умов досягнення необхідної якості очищення. Цільова функція і обмеження мають складний нелінійний характер, тому для пошуку оптимального розв'язку використано комбінований підхід. Першим етапом розрахункової процедури є визначення розподілу потоків стічних вод у процесах за допомогою пінч-аналізу і послідовності процесів очищення за допомогою термодинамічного підходу [11]. На основі даних методів інтеграції процесів отримується початкова точка для оптимізації знайденої структури схеми очищення. На другому етапі формулюється задача НЛП з обмеженнями-нерівностями:

$$\min_X \left\{ \begin{array}{l} \varphi(X) = \sum \xi^k (F_{in}^k(X)) : \\ C_{out}^j(X) \leq C_e^j, C_{in}^j(X) \leq C_k^j \end{array} \right\},$$

де  $X$  — матриця коефіцієнтів розподілу потоків;  $F_{in}^k(X)$  — витрати стічних вод на вході у  $k$ -й процес очищення, м<sup>3</sup>/год;  $\xi^k$  — вартісна функція для  $k$ -го процесу очищення;  $C_{out}^j$  — концентра-

ція  $j$ -го забруднювача на виході з системи очищення, мг/л;  $C_e^j$  — гранично допустима концентрація  $j$ -го забруднювача на виході з системи очищення, мг/л;  $C_k^j$  — концентрація  $j$ -го забруднювача

на вході до  $k$ -го процесу очищення, мг/л;  $C_k^j$  — максимально допустима концентрація  $j$ -го забруднювача на вході до  $k$ -го процесу очищення, мг/л.

Опис загальної структури схеми очищення за допомогою вузлів змішування і розділення приводить до появи великої кількості змінних і обмежень, що визначають кожний такий вузол і процеси очищення у схемі. З метою зменшення розмірності задачі вводяться коефіцієнти розподілу потоків для опису загальної структури схеми очищення. Оскільки початкову точку можна отримати зі структури схеми очищення синтезованої на першому етапі і вона є близькою до глобального оптимуму, проблема застрягання у локальних оптимумах знімається. Перевага запропонованого двостадійного підходу полягає у тому, що кількість змінних і обмежень у задачі НЛП значно менша ніж у задачах, де загальна структура схеми очищення стічних вод представлена у вигляді вузлів змішування і розділення. Крім того, немає потреби аналізувати усі можливі комбінації послідовностей процесів, оскільки визначення послідовності процесів очищення входить до процедури синтезу схеми. Розроблена методика дозволяє синтезувати розподілені схеми із заданою точністю, що неможливо при використанні лише концептуального підходу. Розв'язок задачі НЛП не вимагає складних методів оптимізації, оскільки на першому етапі процедури розрахунку є можливість отримати початкову точку близьку до глобального оптимуму.

З метою врахування фізико-хімічної природи процесів очищення і, в тому числі, підвищення точності розрахунків на другому етапі, до процедури розрахунку вводяться математичні моделі процесів очищення. Роль моделей відіграють рівняння статички очисних процесів. Використання математичних моделей процесів очищення дозволяє врахувати не тільки залежність ефективності процесів від концентрації забруднювачів і витрат стічної води, але й втрати води у схемі, специфіку очисних процесів. Вхідними параметрами моделей є концентрація забруднювача на вході у процес  $C_{in}^j$  та його характеристики, витрати стічних вод у процесі очищення  $F^k$ , конструкційні

параметри очисного обладнання тощо. Наприклад, математична модель процесу відстоювання описується такими рівняннями:

— значення критерію Архімеда

$$Ar = \frac{d_T^3 \rho_P g (\rho_T - \rho_P)}{2 \mu_P},$$

де  $d_T$  — діаметр часточок, м;  $\rho_P$  — щільність середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_T$  — щільність часточок, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_P$  — в'язкість середовища за вказаної температури, Па·с,

— значення критерію Рейнольдса

$$\text{якщо } Ar < 36, Re = Ar/18;$$

$$\text{якщо } 36 < Ar < 83000, Re = 0,152 Ar^{0,714};$$

$$\text{якщо } Ar > 83000, Re = 1,74 \sqrt{Ar};$$

— швидкість вільного осадження (м/с)

$$v_{so} = \frac{\mu_P Re}{d_T \rho_P};$$

— об'ємна частка води у стоках

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{in} \rho_{in}}{\rho_T},$$

де  $\omega_{in}$  — вміст забруднювача у вхідному потоці, кг/кг;  $\rho_{in}$  — щільність вхідного потоку, кг/м<sup>3</sup>;

— швидкість осадження (м/с)

$$\text{якщо } \varepsilon > 0,7, v_{co} = v_{so} \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)};$$

$$\text{якщо } \varepsilon < 0,7, v_{co} = v_{so} \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)};$$

— витрати стічної води на виході із відстійника (м<sup>3</sup>/год)

$$F_{out} = F_{відст} v_{co},$$

де  $F_{відст}$  — задана робоча поверхня осадження відстійника;

— концентрацію забруднювача визначають на основі матеріального балансу процесу розділення з урахуванням того, що концентрація осаду для заданих часу відстоювання і початкової концентрації відома

$$G_{in} = G_{out} + G_{осад};$$

$$G_{in} \omega_{in} = G_{out} \omega_{out} + G_{осад} \omega_{осад},$$

де  $G_{in}$  — масові витрати стічних вод на вході у відстійник, кг/год;  $G_{out}$  — масові витрати стічних вод на виході із відстійника, кг/год;  $G_{осад}$  — масові витрати отриманого осаду, кг/год;  $\omega_{out}$  — вміст забруднювача у вихідному потоці, кг/кг;  $\omega_{осад}$  — вміст забруднювача у осаді, кг/кг,

— коефіцієнт видалення забруднювальної речовини  $j$  у процесі відстоювання

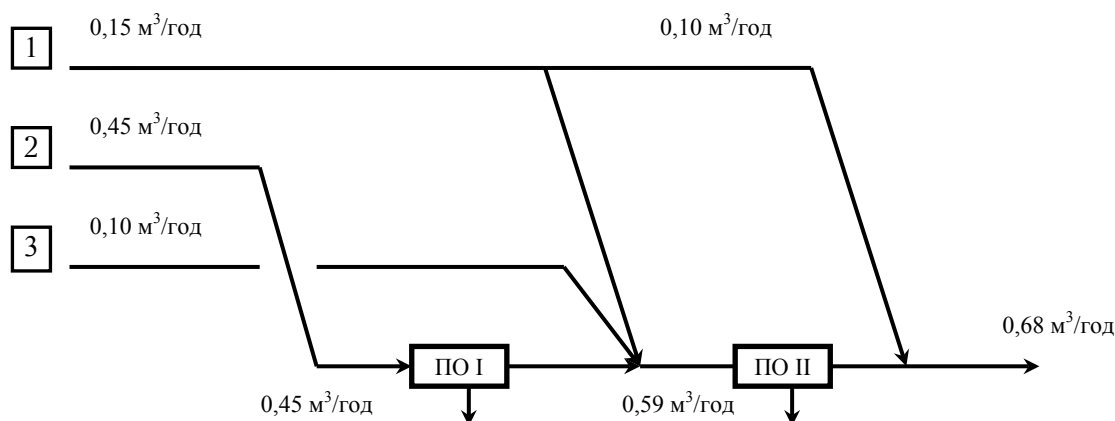
$$r_j = \frac{F \cdot C_{in}^j - F \cdot C_{out}^j}{F \cdot C_{in}^j}.$$

За необхідності у математичній моделі враховується також коефіцієнт форми часточок, можливість утворення агрегатів, нестандартна поведінка часточок тощо.

Моделі статистики процесів очищення дозволяють точніше проводити процедуру синтезу розподілених схем очищення стічних вод.

**Апробація методики.** Апробацію методики було проведено на прикладі вдосконалення системи очищення стічних вод склотарного заводу, що забруднені нафтопродуктами, завислими речовинами та ХПК [12]. За допомогою розподілу потоків у системі очищення IV випуску стічних вод склотарного заводу від дільниці художніх виробів (потік № 1), мийки склобою (потік № 2) та цеху виробництва силікатного клею (потік № 3) вдалось зменшити витрати у збірнику нафтопродуктів (ПО I) на 63 %, у відстійнику (ПО II) — на 58 % у порівнянні з централізованою схемою очищення. Значення концентрації забруднювальних речовин на виході із розподіленої системи очищення при цьому не перевищують встановлені норми (рис.).

Значення коефіцієнтів розподілу потоків після першого етапу розрахунків були такі  $X = [0, 0, 89, 0, 1, 1, 1, 0]$ , значення цільової функції  $\varphi(X) = 1,1 \text{ м}^3/\text{год}$ ; після другого етапу —  $X = [0, 1, 0, 0, 36, 1, 1, 0]$ ;  $\varphi(X) = 1,04 \text{ м}^3/\text{год}$ . У процедурі синтезу схеми були використані математичні моделі збірника нафтопродуктів та відстійника.



Розподілена схема очищення стічних вод склотарного заводу

## Висновки

Запропоновано методику синтезу розподілених систем очищення стічних вод, розроблену на основі концептуальних методів і нелінійного програмування з використанням математичних моделей процесів очищення, що дозволяє проводити розрахунок нових та модернізацію вже існуючих очисних систем. Загальна структура схеми очищення описується за допомогою коефіцієнтів розподілу потоків. Методика була апробована на прикладах модернізації схем очищення стічних вод підприємств різних галузей промисловості, в тому числі харчової, машинобудівної, хімічної тощо. Розрахунки показують, що можливе зменшення навантаження на процеси очищення до 70 % у порівнянні з існуючими схемами очищення за рахунок перерозподілу потоків стічних вод.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Статюха Г. О., Квітка О. О., Джигирей І. М. Модельовання розподілених схем очищення стічних вод промислових підприємств на основі методів Інтеграції Процесів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 1. — С. 27—37.
2. El-Halwagi M. M., Manousiouthakis V. Synthesis of mass exchange networks // AIChE J. — 1989. — № 35. — P. 1233—1246.
3. Wang, Y. P., Smith, R. Design of distributed effluent treatment systems // Chemical Engineering Science. — 1994. — V. 49. — № 18. — P. 3127—3140.
4. Kuo W. J. and Smith R. Effluent treatment system design// Chemical Engineering Science. — 1997. — V. 52. — № 23. — P. 4273—4290.
5. Bagajewicz M. A Review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants // Computers and Chemical Engineering. — 2000. — № 24. — P. 2093—2113.
6. Galan B., Grossmann I. E. Optimal design of distributed wastewater treatment networks // Ind. Eng. Chem. Res. — 1998. — № 37. — P. 4036-4048.

7. Alva-Argaez A., Kokossis A. C., Smith R. Wastewater minimization of industrial systems using an integrated approach // Computers and Chemical Engineering. — 1998. — № 22, Suppl. — P. 741—744.
8. Huang C. — H., Chang C. — T., Ling H. — C., Chang C. — C. A mathematical programming model for water usage and treatment network design // Ind. Eng. Chem. Res. — 1999. — № 38. — P 2666—2675.
9. Pedro Castro, Henrique Matos, Augusto Novais. A new mathematical programming approach for the optimal design of wastewater treatment systems // Proceedings of 8th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction — PRES 2005, 15—18 May 2005, Giardini Naxos, Italy, Set 5.
10. Statyukha G. O., Kvitka O. O., Jezowski J., Dzhygyrey I. M. The application of conceptual design procedures to the retrofit of existing wastewater treatment systems. Proceedings of 7th Conference «Process integration, modelling and optimisation for energy saving and pollution reduction» — PRES 2004, 31 May — 3 June 2004, Praha, Set 4.
11. Кутепов А. М., Мешалкин В. П., Невский А. В., Шарнин В. А., Шорманов В. А. Экологические технологии: энергетический анализ при проектировании водных ресурсосберегающих технологических систем // Инженерная экология. — 2002. — № 1. — С. 50—57.
12. Статюха Г. О., Квітка О. О., Джигирей І. М. Використання методу Пінч-аналізу для моделювання схем очищення стічних вод промислових підприємств // Пр. наук.-практ. конференції міжнародного водного форуму «АКВА УКРАЇНА — 2003». — Київ, 2003. — С. 192—193.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05  
Рекомендована до друку 22.11.05

*Джигирей Ірина Миколаївна* — аспірантка, *Квітка Олександр Олександрович* — доцент.

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