

**ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ПІДПРИЄМСТВ
НА ОСНОВІ СТРУКТУРНОГО ПІДХОДУ**

Статюха Г.О., Єжовський Я*, Єжовська А*, Шахновський А.М., Джигирей І.М., Квітка О.О.
Національний технічний університет України "КПІ", kxtp@list.ru

*Rzeszów University of Technology, Department of Chemical and Process Engineering, Poland,
ichjj@prz.edu.pl

Мінімізація обсягів водоспоживання у хімічній промисловості та споріднених галузях має сьогодні важливе екологічне та економічне значення. Зменшення обсягів водоспоживання дає також змогу зменшити обсяги утворення стічних вод відповідним технологічним процесом.

Істотне скорочення витрати свіжої води і обсягу утворення стічних вод шляхом повторного використання води з частковим її очищенням. Подальше зниження вартості очищення стоків може бути досягнуте раціональним розділенням потоків стічних вод. Щоб досягти істотного прогресу проектуванні схем у згаданих випадках, необхідно знайти оптимальні витрати потоків і їх склад у системі, що складається з водоспоживачів (процесів, що споживають свіжу воду), та процесів часткового або повного очищення забрудненої води – схеми водного господарства (СВГ) промислового підприємства. Зауважимо, що пошук оптимального рішення також має на меті визначення топології системи. Процес оптимального проектування СВГ є достатньо складним і тому зазвичай поділяється на дві частини – проектування схеми водоспоживання (СВС), що включає процеси-водоспоживачі, та проектування схеми водоочищення (СВО). Ученими з Національного технічного університету України "КПІ" та Жешувського технологічного університету у тісному співробітництві було досліджено обидві із згаданих підзадач проектування СВГ. Підходи, застосовувані до обох мають системний характер і базуються на формулюванні і вирішенні задач структурної оптимізації. Зупинимось коротко на деяких найбільш важливих результатах вищезгаданої наукової співпраці.

Оптимізація схем водоспоживання. У межах цього короткого повідомлення зосередимося на спрощеному варіанті СВС – схемі з багатократним використанням без часткового очищення потоків води. Оскільки така схема не містить процесів очищення, то належне скорочення обсягів споживання свіжої води може бути досягнуте тільки шляхом повторного використання частково забрудненої води. В даному випадку мова йде про змішування у певній пропорції потоків відпрацьованої води з виходу водоспоживачів, із свіжою водою. Утворені змішані потоки спрямовуються на вхід водоспоживачів. Проблема проектування СВС може бути коротко сформульована таким чином. Існує P процесів-водоспоживачів. У кожному з цих процесів у воду потрапляють певні забруднюючі домішки. Для кожної з домішок у кожному з процесів задано максимально припустиму концентрацію на вході водоспоживача; кількість забруднювача, що переходить у воду за одиницю часу; концентрацію забруднювача на виході водоспоживача. У такій постановці процеси, що споживають воду, розглядаються як прості протиточні масообмінні апарати. Задано також множину джерела свіжої води з визначеним значеннями концентрацій забруднювачів. Завдання – спроектувати СВС, що відповідає оптимальному значенню певного критерію якості. Зазвичай як функція мети використовується сумарний обсяг споживання свіжої води, проте свою ефективність показало використання більш складних цільових функцій, що враховують взаємний вплив потоків у СВС. Метою розрахунків є отримання оптимальної у термінах обраного критерію СВС, що одночасно відповідає всім заданим технологічним обмеженням (забезпечення належного ступеню чистоти води на вході водоспоживачів).

Як вже згадувалося вище, у представлених дослідженнях було застосовано засновані на оптимізації методи. У основу розрахунків було покладено концепцію оптимізації узагальненої схеми (надструктури). Така концепція передбачає побудову на першому етапі узагальненої схеми водоспоживання, яка містить всі можливі варіанти перерозподілу потоків

у даній схемі водоспоживання. Потім на основі узагальненої схеми формулюються математична задача оптимізації. Нарешті, із застосуванням певних числових методів згадана задача оптимізації вирішується, даючи шукані параметри оптимальної СВС. Головна складність такого підходу – у вигляді застосовуваної задачі оптимізації. Математична задача оптимізації для синтезу оптимальної структури СВС є в загальному випадку нелінійною, і містить у ряді випадків дискретні змінні – маємо задачу частково-цілочисельного нелінійного програмування (ЗЧЦНЛП, MINLPP). При розв'язанні ЗЧЦНЛП неминучі значні обчислювальні труднощі. У представленій формі, для СВС середнього та великого масштабу (більше 10 апаратів-водоспоживачів) оптимальне рішення є практично недосяжним, навіть у випадку застосування потужних комерційних програм-оптимізаторів. Авторами було успішно застосовано на практиці два шляхи вирішення описаної вище проблеми «прокляття розмірності». Було досліджено можливість застосування 1) мета-евристичних/стохастичних підходів до вирішення задач оптимізації; 2) детермінованих алгоритмів у поєднанні з модифікацією вихідного математичного формулювання. Результати спільних досліджень у вказаних напрямках були представлені в багатьох журналах наукових форумах, наприклад в [1-4]. Зокрема, у [3] було запропоновано модель на основі задач лінійного програмування для обчислення максимально досяжного скорочення обсягу водоспоживання. Така модель знаходить застосування на етапі попереднього дослідження СВС, що піддаються модернізації. Такий підхід є більш загальним порівняно із пропонованими іншими дослідниками. Розвитку системного підходу до проектування оптимальної СВС присвячено, зокрема, роботи [1,2]. Тут було запропоновано модель на основі задачі нелінійного програмування. Описана модель є модифікацією вищезгаданої надструктурної моделі загального вигляду. У роботах обґрунтовуються внесені у загальну модель спрощення, які гарантують досягнення оптимальних рішень при проектуванні СВС середньої розмірності із використанням наявних стандартних детермінованих числових методів. Описаний підхід враховує також витрати на трубопроводи при перебудові структури потоків.

Значну увагу в спільних дослідженнях було приділено особливостям промислового впровадження розрахованих оптимальних схем. Досліджено, зокрема, методи аналізу вихідних даних для розрахунку в умовах невизначеності. Обґрунтовано також ефективну методологію оптимізації СВС, що мають у складі процесів не масообмінного характеру [4]. Такі СВС характерні для так званих «екологічних парків» і великих непромислових об'єктів (наприклад, готелів).

Оптимізація схем водоочищення. На додаток до скорочення обсягу стічних вод, що утворюються схемою водоспоживання, зменшення вартості очищення води може бути досягнуте за рахунок оптимального структури системи водоочищення. Ключовим моментом для скорочення вартості експлуатації очисних споруд є застосування розподілених систем очищення стічних вод. Основою структурної оптимізації СВО є поділ або поєднання окремих потоків стічних вод в системах очищення. Інвестиційна вартість і операційні витрати для очисних споруд залежать від належного вибору структури СВО і параметрів потоків стічних вод, що очищуються в різних процесах. У розподіленому очищенні стічних вод потоки або очищуються окремо, або тільки частково змішуються, що скорочує обсяги опрацьовуваних потоків у порівнянні з централізованими СВО. Це, у свою чергу, скорочує загальні експлуатаційні витрати, оскільки вони для більшості очисних процесів пропорційні величині витрати стічних вод.

У результаті співпраці було запропоновано ефективний і добре керований проектувальником системний підхід до проектування оптимальних СВО. Проектна процедура є послідовною і застосовує евристичні методи у поєднанні із математичним програмуванням. На першому етапі для створення початкової структури СВО використовується інструментарій водного пінч-аналізу. Наступним кроком є створення узагальненої схеми СВО і задачі математичного програмування на її основі з коефіцієнтами розділення у якості факторів оптимізації. Доведено, що рішення, отримане на етапі пінч-

аналізу, є добрим початковим значенням для вирішення згаданої математичної задачі числовими методами нелінійного програмування. Такий підхід дає змогу використовувати для розрахунків навіть найпростіші методи нелінійної оптимізації. Як і у випадку вищеописаного проектування СВС, запропонована процедура оптимізації може використовуватися як для синтезу нових СВО, так і для модифікації вже існуючих схем водоочищення. Основні ідеї запропонованої процедури, а також результати розрахунків для типових літературних прикладів представлено у спільних публікаціях. Описана методологія продовжує розвиватися. Так, розглядається можливість підвищення точності розрахунку шляхом використання більш точних моделей процесів очищення; було враховано витрати на транспортування потоків стічних вод, тощо. Спільні роботи представляють результати впровадження модифікованої процедури для промислових СВО.

Співпраця між науковцями НТУУ «КПІ» та ЖТУ не обмежувалася дослідженнями щодо оптимізації СВГ. Слід згадати також опубліковані результати спільних досліджень у галузі «більш чистого виробництва» та екологічних аспектів функціонування промисловості у цілому. Було виконано спільні дослідження у галузі інструментарію і методології автоматизованого проектування технологічних процесів, у галузі математичних методів оптимізації (зокрема, широко застосовуваного дослідниками ЖТУ адаптивного випадкового пошуку оптимуму). Розвиваються спільні дослідження щодо синтезу оптимальних схем тепло- та масообміну.

Висновки. Підсумовуючи, можна твердити, що на шляху наукової співпраці між науковцями Національного технічного університету України «КПІ» та Жешувського технологічного університету досягнуто істотних успіхів. Планується подальша плідна співпраця між науковими колективами у важливих областях хімічної технології та інженерії.

Подяка: Автори складають щиру подяку науковцям, що також брали участь у спільних дослідженнях: Л.М. Бугаєвій, Ю.О. Безносику, Н.Є. Теліціній з НТУУ «КПІ» та Г. Поплевському, Р. Бохенку, К. Вальчику з ЖТУ.

1. *Shakhnovsky A.M., Jeżowski J., Kvitka A., Jeżowska A., Statiukha G.* Investigations on optimisation of water networks with the use of mathematical programming // *Chemical and Process Engineering*.-2004.-No 3/3.-С. 1607-1612.
2. *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
3. *Jeżowski J., Walczyk K., Shakhnovsky A.* Systematic methods for calculating minimum flow rate and cost of water in industrial plants // *Chem. Proc. Eng.* –2006. –No 27. – С. 1137-1154.
4. *Walczyk K., Poplewski G., Jeżowski J., Jeżowska A., Shakhnovsky A.* Optimization of Water Network with Models of Non-Mass Transfer Processes // *Chemical and Process Engineering*. –2007. –No 28. – С. 515-525.