

**Аналітичне та екологічне приладобудування**

6. Методику виконання вимірювань [2] необхідно доповнити розробленою методикою, алгоритмами та програмним забезпеченням для вимірювання витрати та визначення кількості (об'єму) сухої частини вологого природного газу.

7. Для обчислювачів витрати вимірювальних комплексів необхідно розробити та впровадити програмне забезпечення розрахунку кількості (об'єму) сухої частини вологого природного газу.

**Література**

1. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. Изд-во стандартов. М.: 1982. – 319 с.
2. ГОСТ 8.586.5:2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Методика выполнения измерений. Часть 5. М.: Стандартинформ, 2007. - с. 149 –244.
3. ТУ У 320.00158764.007-95 Гази горючі природні, що подаються в магістральні газопроводи. Технічні умови.
4. ГОСТ 5542-87 Газ природный горючий для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

**Крук И.С. Новые аспекты обоснования выбора физических параметров для стандартных условий измерения расхода**

В работе проведен анализ показателей качества природного газа, обоснован выбор значений для включения их в стандартные условия измерения при расчете расхода газа.

**Kruk I. New aspects of choice reasoning of physical parameters for standard flow metering terms**

The paper analyze the quality factors of natural gas and the choice of their values to supplement the standard conditions of flow measuring of natural gas was reasoned.

*Надійшла до редакції  
22 березня 2009 року*

УДК 519.713

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВИКИДАМИ СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНОГО ЗАВОДУ

*Безрук З.Д., Порєв В.А., Харагоргієв С.М., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*Показано, що за допомогою дворівневої системи моніторингу можна підвищити ефективність засобів контролю складу димових газів сміттєспалювального заводу. Запропоновано метод ідентифікації координат джерел забруднень атмосфери, який дозволяє знаходити розв'язок за порівняно невелику кількість ітерацій*

**Вступ**

Особливе місце серед проблем екологічного моніторингу займають проблеми контролю забруднення атмосфери мегаполісів, де мешкає значна частина населення країни, і необхідно враховувати значні відмінності екологічних параметрів (промислова зона, рекреаційна зона, житловий масив).

Для ефективного та успішного вирішення цих проблем контроль забруднення атмосфери повинен базуватися на принципах достовірності та орієнтованості на забезпечення своєчасних управлінських рішень, що, в свою чергу, вимагає комплексного підходу до екологічного моніторингу.

Одними із найшкідливіших джерел забруднення атмосфери мегаполісів та навколишнього середовища є сміттєспалювальні заводи (ССЗ).

При спалюванні сміття утворюються високотоксичні викиди, що містять більш ніж 400 шкідливих хімічних сполук. Дослідження забруднення територій навколо ССЗ, що проводилися в 90-х роках в Україні, США, Японії та Європі, показали значні перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Проте, незважаючи на подальше вдосконалення технологічного обладнання, ССЗ до цього часу входять в число основних джерел забруднення навколишнього середовища [1].

При цьому локальні перевищення ГДК забруднюючих речовин в міській атмосфері спостерігаються досить часто, що в умовах одночасного функціонування значної кількості потенційних джерел забруднення породжує проблему їх ідентифікації та ускладнює прийняття ефективних управлінських рішень в сфері охорони навколишнього середовища.

### **Аналіз проблеми контролю забруднення атмосфери мегаполісів**

Сучасні мобільні та стаціонарні автоматизовані системи екологічного моніторингу надають оперативну інформацію про забрудненість атмосфери найбільш небезпечними забруднювачами, що дозволяє оцінити поточну якість повітря в районах, де знаходяться станції моніторингу [2].

Але для ефективного екологічного моніторингу цієї інформації недостатньо, так як для оцінки впливу забруднень на населення та для прогнозування екологічних ситуацій необхідні дані про значення концентрацій викидів ССЗ на значній території мегаполісу.

Існуючі розрахункові методи дозволяють оцінювати концентрації шкідливих домішок в складі димових газів в двометровому шарі на рівні землі, а також в вертикальному та горизонтальному перерізі димового факела на відстані до 100 км від джерела. Розрахункові моделі враховують висоту та діаметр труби, температуру газів, які виходять з труби та повні витрати димових газів на перерізі труби, середню по перерізу труби швидкість газів, властивості атмосфери та метеорологічні дані (температуру навколишнього середовища, швидкість вітру).

Однак, ефективність такої схеми екологічного моніторингу мегаполісу не може вважатися задовільною через низьку достовірність розрахункових моделей, яка залежить від точності задання параметрів атмосфери, серед яких найважливішу роль відіграють дані про швидкість і напрям вітру в точці розташування джерела викидів. Але стан атмосфери та її стабільність у часі і просторі є складними, динамічними функціями висоти, тому моделювання процесу поширення забруднень при значній нестабільності атмосфери в ближній до дже-

рела викидів зоні, яке базується на даних метеостанцій для фіксованих координат і значень висоти, пов'язане із значними похибками.

Отже, підвищення достовірності та інформативності екологічного моніторингу атмосфери мегаполісів неможливе без підвищення ефективності інструментальних засобів та вдосконалення методів розрахунку приземних концентрацій викидів сміттєспалювального заводу, в тому числі і за рахунок отримання додаткової інформації про джерела та чинники, які впливають на стан атмосферного повітря.

**Метою** даної роботи є дослідження можливості підвищення ефективності інструментальних засобів контролю складу димових газів та вдосконалення підходів до моделювання розповсюдження шкідливих речовин шляхом визначення причин зміни стану забрудненості повітря.

### **Підвищення ефективності засобів контролю складу димових газів**

На сьогодні вже практично використано точностний потенціал засобів контролю складу димових газів і в цьому плані подальше підвищення достовірності екологічного моніторингу та покращення екологічної ситуації можливе тільки внаслідок розширення функціональних можливостей наявних інструментальних засобів, наприклад, за рахунок створення дворівневої ієрархії функціонування. При цьому до рівню екологічного моніторингу додається рівень технологічного моніторингу димових газів, які виникають під час технологічних процесів. При відповідному керуванні режимами горіння оптимізується сам технологічний процес, знижується споживання сировини і енергоносіїв, та поліпшуються екологічні та економічні показники підприємства.

Типова газоаналітична система контролю (ГАСК) складається з комплексу автоматичних стаціонарних газоаналізаторів для вимірювання концентрацій димових газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CH}$ ) з системою відбору і підготовки проби, сенсорів-вимірювачів температури, тиску і інших параметрів димового потоку [3]. На сьогодні ГАСК знайшли найбільше розповсюдження в Західній Європі, США і Японії (західна класифікація таких систем – CEMS).

АТ “Украналіт” на базі типової ГАСК вперше в СНД розробив і впровадив в промислову експлуатацію на київському ССЗ “Енергія” дворівневу систему екологічного і технологічного моніторингу та оптимізації процесів горіння [4].

Перший рівень системи представляє собою чотири комплекти газоаналітичних комплексів ТК-1, по одному на кожен з 4-х котлоагрегатів ССЗ. Комплекс ТК-1 складається з високочутливого газоаналізатора 151ЭХ02, що вимірює концентрацію кисню ( $\text{O}_2$ ) у зоні виходу продуктів горіння кожного котла. Високотемпературний зонд газоаналізатора 151 ЭХ02 через фланець у стінці котлоагрегату вводиться безпосередньо в камеру згоряння сміття. На торці зонда знаходиться цирконієвий сенсор-датчик ( $\text{ZrO}_2$ ), здатний працювати і проводити виміри  $\text{O}_2$  в зоні високих температур  $\sim 600^\circ\text{--}800^\circ\text{C}$ . Конструкція газоаналізатора дозволяє експлуатацію без складних пристроїв пробовідбору і пробопідго-

товки та забезпечує довгостроковий режим експлуатації в екстремальних умовах.

Контроль кисню в енергетичних установках визначається необхідністю забезпечення оптимального співвідношення паливо/повітря в процесі горіння. Якщо згорання повне, то його продукти складаються тільки з інертних компонентів, тобто нездатних до подальшого окислювання газів. Це здебільшого водяний пар,  $\text{CO}_2$ . При недостатності кисню окислювання вуглецю є неповним, отже, наявність  $\text{CO}$  в димових газах говорить про неефективність використання енергоресурсів. Якщо процес спалювання не відповідає оптимальним технологічним умовам, то в продуктах згорання з'являються горючі компоненти —  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , н  $\text{CH}_4$ .

До складу комплексу входить також багатоканальний газоаналізатор 325 ФА01, який вимірює концентрації оксиду і діоксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), сумарних вуглеводнів (НС) на вихідному газоході кожного з котлоагрегатів. В газоаналізаторі 325ФА01 вперше застосована оптична схема з однією вимірювальною кюветою, яка дозволяє одночасно вимірювати концентрації  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  в широкому діапазоні концентрацій з високою точністю.

Комплекси ТК-1 дозволяють у реальному часі вимірювати склад димових газів кожного з 4 котлоагрегатів і корегувати співвідношення повітря/паливо для оптимізації процесів горіння і зменшення токсичних викидів в атмосферу.

Другий рівень системи являє собою екологічний комплекс ЕК-1, встановлений на вихідних газоходах після пилових електрофільтрів. Основу комплексу складає газоаналізатор "СПЕКТР 4", в якому вперше впроваджена багатоходова оптична кювета для вимірювання концентрації  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  у широкому діапазоні концентрацій. Така оптична схема дозволяє досягти високої чутливості при похибці вимірювань не більше  $\pm 3\%$ , реалізувати принцип багатоканальності вимірювань в одному приладі.

Комплекси ТК-1 і ЕК-1 відповідають вимогам методичної та інструментальної однорідності, що означає застосування єдиної методики в межах кожного з функціональних блоків та використання уніфікованої технічної бази.

### **Вдосконалення методу ідентифікації координат джерел забруднень**

Збільшення інформативності моніторингу можливе завдяки отриманню додаткової інформації про джерела та чинники, які впливають на стан атмосферного повітря. Для цього зазвичай застосовується ітераційний метод при якому початкові параметри моделювання оптимізуються так, щоб його результати найкраще відповідали даним вимірювань [5].

Ітераційний метод є особливо ефективним в локальному масштабі розсіювання забруднень (масштаб міста), при можливості застосування порівняно простих та швидкодіючих моделей розсіювання забруднень. Проблемами ітераційного методу є низька достовірність, обумовлена його чутливістю до похибок у даних вимірювань та необхідність значної кількості ітерацій (до  $10^4$ ) алгоритму оптимізації [6].

Нами показано, що внаслідок збільшення швидкості пошуку можна вдосконалити метод ітераційного розв'язування обернених задач розсіювання забруднень в локальних масштабах.

Задамо  $n$  точок вимірювання концентрацій забруднень з координатами

$$X_i, Y_i, i=1, n. \quad (1)$$

В цих точках на протязі певного часу вимірюється концентрація забруднень  $C_{ik}$  в моменти часу  $t_k$

$$C_{ik}, i=1, n, k=1, l. \quad (2)$$

Зміна концентрацій забруднень пов'язана з впливом  $m$  джерел забруднень, координати яких позначимо

$$X_j^*, Y_j^*, j=1, m$$

На рис. 1 приведено дані вимірювань концентрацій CO, які отримані постом автоматизованого моніторингу "Атмосфера-10" протягом 10 діб. Можна бачити, що на рівні деякої фонові концентрації забруднень, яка суттєво не змінюється на протязі доби, спостерігаються збільшення концентрацій у декілька разів, викликані впливом певних джерел.

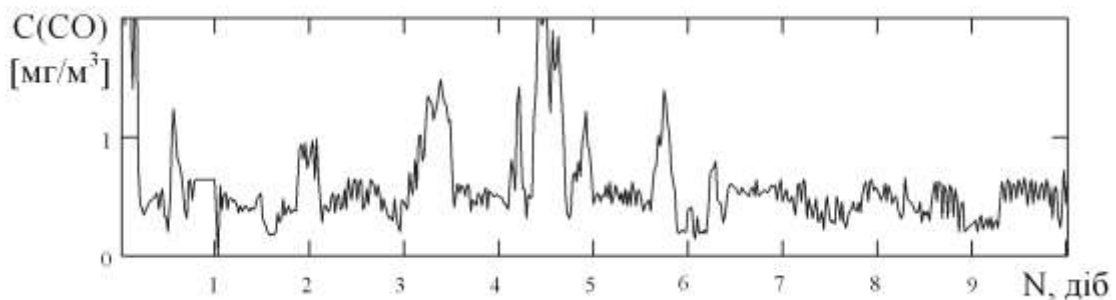


Рис. 1. Дані моніторингу, отримані станцією "Атмосфера-10"

Якщо вважати метеорологічні умови сталими, то розрахована результуюча концентрація забруднень в точці  $i$ , перенесена з джерела  $j$ , залежить від координат джерела та точки вимірювання

$$C_{ijk}^* (X_i, Y_i, X_j^*, Y_j^*), i=1...n, j=1...m, k=1...l. \quad (3)$$

Оскільки на кожну точку вимірювання впливають кілька джерел, сумарна концентрація може бути розрахована як сума

$$C_{ik}^* = \sum_{j=1}^m C_{ijk}^* (X_i, Y_i, X_j^*, Y_j^*), i=1...n, k=1...l. \quad (4)$$

При цьому розрахована концентрація забруднень буде близькою до вимірюваної концентрації  $C_{ik}$

$$C_{ik} \approx C_{ik}^*. \quad (5)$$

У випадку, коли координати джерел  $(X_j^*, Y_j^*)$  невідомі, вони можуть бути знайдені внаслідок пошуку таких значень, при яких розрахована концентрація

найближча до вимірюваної. Отже, йдеться про мінімізацію розходження між розрахунковими та вимірюваними концентраціями, що можна сформулювати як оптимізацію за критерієм розбіжності між розрахунковими та вимірюваними даними. В подібних задачах розбіжність характеризують середнім квадратом різниць між порівнюваними даними

$$F(X_j^*, Y_j^*) = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i^*)^2 \rightarrow \min_{X_j^*, Y_j^*}, i=1 \dots n, j=1 \dots m, \quad (6)$$

де  $C_i = \sum_{k=1}^l C_{ik}$ ,  $C_i^* = \sum_{k=1}^l C_{ik}^*$ ,  $k=1 \dots l$ .

Розв'язком вихідної задачі буде розв'язок задачі мінімізації

$$F(X_j^*, Y_j^*) \rightarrow \min_{X_j^*, Y_j^*, j=1 \dots m}. \quad (7)$$

Внаслідок проведеного нами аналізу встановлено, що методи оптимізації, які мають стохастичну складову, наприклад, метод “рою частинок”, дозволяють отримувати розв'язок за менше число ітерацій.

Метод “рою частинок” полягає в ітераційному розрахунку за кількома евристичними координатами та швидкостями абстрактних частинок, що рухаються в багатовимірному просторі пошуку. Координати частинки відповідають набору шуканих параметрів, для кожного з яких розраховується значення критерію оптимізації. Пошук закінчується прибуттям всіх частинок до точки глобального мінімуму.

В даній роботі пропонується вдосконалення критерію оптимізації, що підвищує ефективність методу рою частинок. Критерій оптимізації розбіжності між даними вимірювань та розрахунковими даними у вигляді (6) не враховують значимість даних. Аналіз типових даних моніторингу (рис. 1) дає змогу припустити, що характерною для вихідних даних ознакою є координати пікових значень, які виділяються над фоновим рівнем. Розглядаючи при розрахунку критерію лише пікові значення, можна спростити процедуру порівняння, а також зменшити чутливість пошуку до незначних змін вихідних даних. Пікові значення знаходяться будь-яким методом та нормуються в діапазоні [0..1]. Фоновий рівень відкидається шляхом віднімання. Чисельно критерій може бути виражений як сума різниць між піковими значеннями результатів моделювання і даних вимірювань. Окрім цього, необхідно врахувати розбіжності в кількості пікових значень.

Для розрахунку критерію використовуються наступні вихідні дані

$\hat{x}_i, \hat{y}_i, i=1 \dots N$  – координати пікових значень, отриманих при вимірюваннях;

$\bar{x}_j, \bar{y}_j, j=1 \dots M$  – координати пікових значень, отриманих при моделюванні, за

деякими початковими умовами;

$N$  – кількість пікових значень, отриманих при вимірюваннях;

$M$  – кількість пікових значень, отриманих при моделюванні;

$K$  – коефіцієнт, що задає вплив на значення критерію різниці кількостей пікових значень, прийmemo  $K=10$ ;

Для розрахунку критерію F використаємо алгоритм, що складається з наступних кроків.

1. Прийняти  $F=0$ .
2. Для кожного значення  $i=1..N$ , якщо  $N < M$ , або  $i=1..M$ , якщо  $N > M$ :
  - а) знайти таке значення  $j$ , що  $|\hat{x}_i - \bar{x}_j| \rightarrow \min$ ;
  - б) обчислити  $F_i = |\hat{x}_i - \bar{x}_j| + |\hat{y}_i - \bar{y}_j|$ ;
  - в) обчислити  $F = F + F_i$
3. Обчислити  $F = F + |N - M| \cdot K$ .

На рис. 2 показаний приклад даних, нормованих в діапазоні [0..1], для яких показані координати пікових значень, що використовуються при розрахунку критерію.

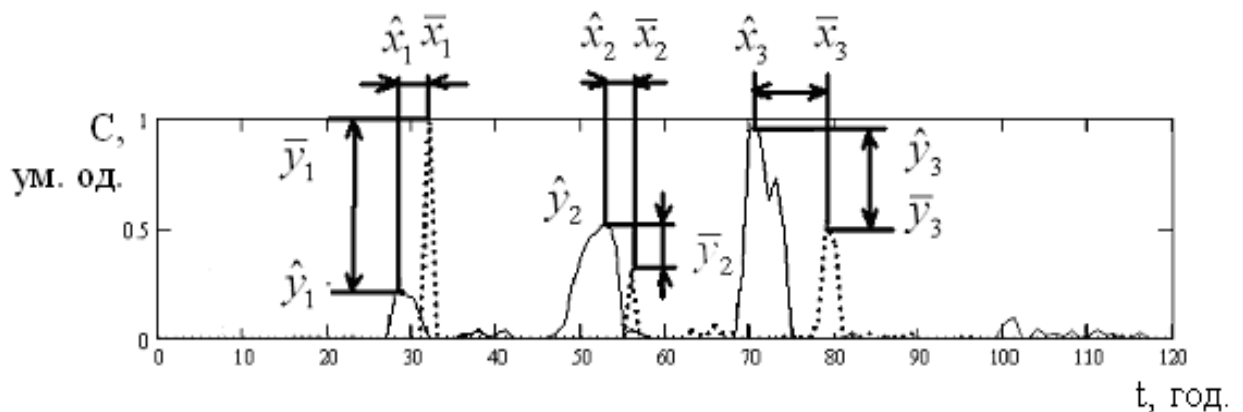


Рис. 2. Відстані між характерними точками наборів даних для оцінки розходження між даними, що використовується в якості критерію оптимізації

Для даного прикладу при  $N = M = 3$  маємо

$$F = (|\hat{x}_1 - \bar{x}_1| + |\hat{y}_1 - \bar{y}_1| + |\hat{x}_2 - \bar{x}_2| + |\hat{y}_2 - \bar{y}_2| + |\hat{x}_3 - \bar{x}_3| + |\hat{y}_3 - \bar{y}_3|).$$

Отже, внаслідок цих розрахунків значення F буде тим більше, чим більша розбіжність між даними моделювання та вимірювань.

Для спрощення розробки тестового програмного забезпечення в якості такої моделі використана модель ISC3ST, що реалізована як окремий модуль. Ця модель стандартизована агентством з охорони навколишнього середовища США [7] та відкрита для вільного використання.

### Результати досліджень та їх аналіз

Для перевірки однозначності рішення оберненої задачі і збіжності до рішення внаслідок оптимізації використаємо імітацію даних вимірювань, отриману за допомогою моделювання.

Задамо певний сценарій розсіювання забруднень, тобто оберемо (довільно) розташування джерел і точок вимірювання та метеорологічні умови за певний

період. Проведемо моделювання, отримавши зміну концентрації в точках вимірювання та використаємо ці дані замість даних реальних вимірювань.

У випадку кількох джерел зручним для аналізу параметром є ступінь впливу кожного окремого джерела на загальну концентрацію. Виразимо цей вплив як коефіцієнт, що дорівнює відношенню розрахованої концентрації забруднень, перенесених з джерела в точку, до сумарної концентрації в точці за весь час вимірювань

$$K_i = \frac{\sum_{k=1}^l C_{ijk}^*}{\sum_{k=1}^l C_{ik}^*} \cdot 100\%, i = 1 \dots n, j = 1 \dots m. \quad (8)$$

Оберемо тестові умови (рис. 4): в області площею 100 км<sup>2</sup> розташована точка моніторингу (1) та два джерела викидів (2) та (3), вклад яких в концентрацію забруднень в точці (1) складає, відповідно, 18% та 81%. За даними моделювання застосуємо методику пошуку джерел, вважаючи їх координати невідомими параметрами.

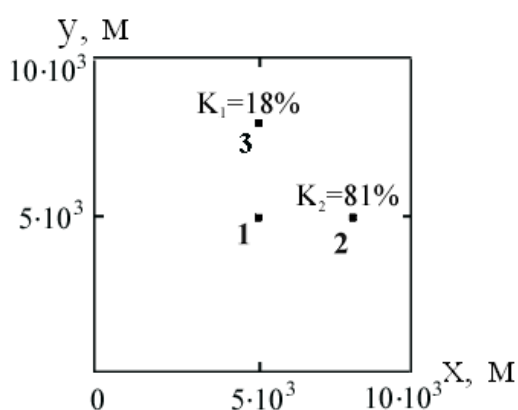


Рис. 3. Приклад сценарію тестування: 1 – точка, для якої розраховується імітація вимірювань; 2, 3 – модельні джерела забруднень;  $K_1$ ,  $K_2$  – коефіцієнти за формулою (7)

Результати застосування методики, за якими можна бачити процес сходження пошуку до оптимального рішення, показано на рис. 4. Порівняння рис.3 та рис 4d показує, що пошук координат джерел забруднень збігається до координат, заданих початково. Співпадають також, з незначним відхиленням, знайдені за формулою (8) коефіцієнти впливу.

Ці результати на основі тестування з використанням синтетичних вхідних умов показують принципову можливість ідентифікації джерел забруднень.

Порівняння отриманих результатів з результатами інших робіт може бути лише якісним, оскільки при схожій меті, постановки задач суттєво відрізняються.



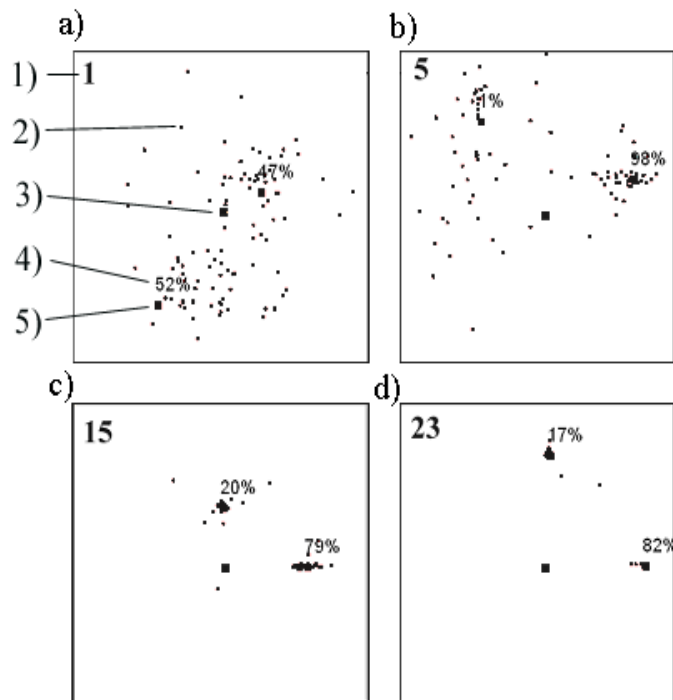


Рис 4. Процес пошуку координат джерел. 1) номер ітерації; 2) частинки в просторі пошуку; 3) точка вимірювань; 4) коефіцієнт впливу за (8); 5) найкраще поточне наближення

Наприклад, в роботі [6] приймаються відомими координати джерел і координати точок вимірювання, отже, пошук проводиться лише для коефіцієнтів впливу джерел. На основі аналізу таких даних за достатній період часу можна встановити зони найбільшого екологічного ризику для людини.

### Висновки

За допомогою дворівневої системи моніторингу можна підвищити ефективність інструментальних засобів контролю складу димових газів ССЗ, оптимізувати процес горіння, знизити витрати палива, зменшити шкідливі викиди в атмосферу на 10-15 %, збільшити кількість спалюваного сміття на питому одиницю палива.

Запропонований підхід до ідентифікації координат джерел забруднень атмосферного повітря відрізняється вдосконаленим методом пошукової оптимізації та алгоритмом розрахунку критерію оптимізації.

Метод пошукової оптимізації порівняно з аналогічними методами дозволяє знаходити наближений розв'язок у великому просторі пошуку за порівняно невелику кількість ітерацій.

Практична реалізація і тестування алгоритму пошуку показали його задовільну збіжність, оскільки знайдені в результаті координати з незначним відхиленням співпадають з заданими. Розроблене тестове програмне забезпечення

можна використати в якості основи для створення програмного продукту аналізу реальних даних автоматичних станцій екологічного моніторингу з метою ідентифікації джерел забруднення.

За результатами моделювання можна визначати зони для встановлення додаткових інструментальних засобів моніторингу.

### Література

1. Гринин А.С.,Новиков В.Н. Промышленная переработка и бытовые отходы: Хранение, утилизация, переработка. –М.:ФАИР-ПРЕСС, 2002.-336с.
2. Дашковский А.А., Рыжков В.Ф. Автоматические станции контроля загрязнения атмосферы в экологическом мониторинге Украины // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. –2003. № 1 – С.10-12.
3. Приміський В.П. Багатоканальний газоаналітичний комплекс для оптимізації процесу горіння і екологічного моніторингу сміттєспалювального виробництва// Вісник НТУУ “КПІ” Приладобудування № 24, 2002.-с. 93-98.
4. Приміський В.П., Визнюк А.А., Безрук З.Д. Створення систем технолого-екологічного моніторингу забруднення атмосфери // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. Київ. № 2, 2004. с. 66-71.
5. Seibert P. Methods for source determination in the context of the CTBT radionuclide monitoring system // Proceedings Informal Workshop on Meteorological Modelling in Support of CTBT Verification, 2000.
6. Haupt S. A demonstration of coupled receptor/dispersion modeling with a genetic algorithm // Atmospheric Environment. –2005, №39, P. 7181–7189.
7. Guideline on Air Quality Models (Revised) and Supplements. — EPA-450/2-78-027R et seq., published as Appendix W to 40 CFR Part 51 (7-1-99 Edition). U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, 1999.

Безрук З.Д., Порев В.А., Харагоргієв С. М. <b>Усовершенствование методов и средств контроля загрязнения атмосферы выбросами мусоросжигающих заводов</b> При помощи двухуровневой системы мониторинга можно повысить эффективность средств контроля дымовых газов мусоросжигающего завода. Предложен метод идентификации координат источника загрязнения, позволяющий находить решение в течение сравнительно небольшого количества итераций.	Bezruk Z.D., Poryev, V.A. Haragorgiev S.M. <b>Improving the means for the control of atmospheric pollutions caused by exhaust of waste-processing plants</b> It is shown that by using the two-tiered system of monitoring it is possible to raise the efficiency of means used to control of the exhaust gases in the waste-processing plant. A method to identify the coordinates of pollution sources is proposed. This method allows for the solution in a relatively low number of iterations.
--	--

Надійшла до редакції  
8 травня 2009 року