

## Аналітичне та екологічне приладобудування

5. Троц А. А. Основи математичного опису теорії Дірака-Реаліума. Нац.техн.ун-т України “Київ.політехн. ін-т”, - Київ, 1995, - 38 с.: іл. – Бібліогр.: 5 назв. – Рос. – Деп. в ДНТБ України 20.12.95 № 130-Ук96.
6. Кокаровцев В. В., Троц А. А. Фізичні аспекти теорії Дірака-Реаліума. Нац.техн. ун-т України “Київ.політехн. ін-т”, - Київ, 1995, - 50 с.: іл. – Бібліогр.: 6 назв. – Рос. – Деп. в ДНТБ України 20.12.95 № 129-Ук96.
7. Таланчук П. М. Дифференциальное уравнение причинно-следственных связей / П. М. Таланчук, В. А. Остафьев, А. А. Троц и др. // Вестник НТУУ «КПИ». Серия приборостроение. – 1995. – Вып. 25. – С. 3 – 19.
8. Троц А. А. Причинно-следственные аспекты проектирования оснастки. Перспективные технологии, оснастка и методология подготовки производства. Научно-технический сборник; под ред. проф. Румбешты В.А., Глоби А.В. / А. А. Троц, В. Г. Буряк, Ю. Б. Глушенко – К.: ТОВ “Международ.фин. агенство”, 1997. – С. 64 – 66.
9. Дружинин В. В., Кондоров Д. С. Системотехника. – М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.
10. Розенталь И. Л. Элементарные частицы и структура Вселенной. – М.: Наука, 1984. – 112 с.
11. Бояринов В. А. Синтез математической модели средств измерений индуктивным методом самоорганизации на ЭВМ / В. А. Бояринов, В. Т. Рущенко // Вестн. Киев. политехн. ин-та. Приборостроение. – 1985. – Вып. 15. – С. 37.

Надійшла до редакції  
27 квітня 2015 року

© Троц А. А., 2015

УДК 543.082

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПИЛУ ДИМОВИХ ГАЗІВ

*Корнієнко Д. Г.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна*

*В даній статті розглянуто проблему контролю викиду пилу в димових газах промислових підприємств. Проаналізовано нормативи гранично-допустимих викидів пилу різних речовин та нормативи викидів пилу від різних виробництв. Особлива увага звертається на аналіз існуючих методів вимірювання концентрації пилу і відповідних інструментальних засобів контролю пилу.*

*На основі досліджень для зменшення похибки вимірювання і розширення можливостей гравіметричного методу для вимірювання концентрацій пилу запропоновано двухтактний інваріантний метод вимірювання пилу.*

***Ключові слова:** пил, гравіметричний метод, оптичний метод, електродинамічний, трибоелектричний, інваріантність, норматив викиду.*

#### **Вступ**

Одним з основних забруднювачів атмосферного повітря є тверді суспендовані частинки або пил. Джерелами викидів пилу з димовими газами є виробничі процеси теплових електростанцій (ТЕС), теплоелектроцентралей (ТЕЦ), металургійних заводів, збагачувальних фабрик гірничо-металургійного комплексу, цементних заводів, елеваторів, сміттєспалювальних заводів. Значна кількість пилу виділяється при перевалці сипучих вантажів. Частинки, що утворюються в результаті згорання, можуть мати в собі небезпечні речовини, так як:

азбест, важкі метали тощо. Пил у димових газах промислових підприємств характеризується великими концентраціями, широким спектром розмірів частинок (0,1 – 120 мкм), високими швидкостями і температурами пило-газового потоку. Підвищена увага до питань охорони довкілля, включаючи санітарні норми, атестацію робочих місць, викликає необхідність цілодобового контролю концентрації пилу – автоматичними пиломірами, що реалізують різні методи вимірювання залежно від умов експлуатації, місця установки, режиму експлуатації, діапазонів, вимог до швидкодії і надійності.

### **Огляд літературних джерел та постановка задачі**

На сьогодні існують декілька основних методів вимірювання пилу і відповідно і відповідно автоматичних пиломірів, що їх реалізують. В роботах [1, 2, 3] детально розглянуті питання побудови оптико-електронних пиломірів для вимірювання шахтного пилу.

У дослідженні [4] проаналізовано оптичний пиломір для контролю димових газів ТЕС. Оптичні пиломіри розраховані на значні концентрації пилу до 100 мг/м<sup>3</sup>, вимірювання фонових концентрацій пилу в санітарній зоні, атестація робочих місць оптичними пиломірами неможлива внаслідок низької чутливості і методичної похибки. В матеріалах наукової публікації [5] вимірювання шахтного пилу побудовано на вимірюванні аеродинамічного опору фільтра в процесі його запилення для створення переносного експрес приладу оперативного контролю запиленості повітря в гірничих виробках вугільних шахт. Але цей метод також не дозволяє проведення вимірювання концентрації пилу в межах 0-10 мг/м<sup>3</sup>. Застосування, рекомендованого відповідними санітарно-гігієнічними нормативами гравіметричного методу, в свою чергу обмежено діапазоном вимірювання пилу 0-10 мг/м<sup>3</sup>[6,7]. Таким чином, виникає потреба в аналізі існуючих методів вимірювання концентрації пилу і відповідних пиломірів і розробці рекомендації по їх застосуванню залежно від умов використання.

### **Особливості нормування концентрації пилу**

Згідно Державних санітарних правил охорони атмосферного повітря населених місць від забруднення хімічними і біологічними речовинами, ДСП-201-97 встановлені нормативи гранично-допустимих концентрацій (ГДК) пилу різних речовин (Таблиця 1 [6]).

Із табл. 1, витікає, що діапазон вимірювання концентрації різних видів пилу у атмосферному повітрі коливається у межах 0,0001 до 0,5 мг/м<sup>3</sup>. Відповідно чутливість і похибка пиломірів повинна забезпечити вимірювання концентрації у даному діапазоні.

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 28.12.2001 №1780 затверджені нормативи ГДК викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел для різних виробничих процесів у промисловості (Таблиця 2 [7]).

Таблиця 1. Нормативи гранично-допустимих концентрацій (ГДК) пилу

№ з/п	Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3*</sup>		Клас Небезпечності
		Максимальна разова	Середньодобова	
1	2	3	4	5
1	Пил азбестовмісний	-	0,06 волокон в 1 мл повітря	1
2	Пил бавовни	0,2	0,05	3
3	Пил зерновий	0,2	0,03	3
4	Пил каїніту	0,5	0,1	3
5	Пил калімагnezії (калімаг-40)	0,5	0,15	3
6	Пил неорганічний,	0,3	0,1	3
7	Пил поліметалічний	-	0,0001	1
8	Пил цементного виробництва (	-	0,02	3
9	Піридин	0,08	0,08	2
10	Поліполіфеніленоксид	0,5	0,15	4

Із табл. 2 видно, що діапазон концентрації різних видів пилу у різних технологічних процесах коливається у межах 1,0 до 2000,0 мг/м<sup>3</sup>. Відповідно чутливість, похибка і головне швидкодія пиломіра повинна забезпечити вимірювання концентрації у даному діапазоні [8]. Розглянемо найбільш поширені методи вимірювання пилу: гравіметричний, фотометричний, трибоелектричний, електродинамічний.

### Гравіметричний метод

Згідно ГОСТ 17.2.4.05-83 «Гравіметрический метод определения взвешенных частиц пыли» масову концентрацію пилу визначають методом зважування частинок пилу на спеціальному фільтрі при проходженні (прокачуванні) через нього фіксованого об'єму пило-газової проби, при цьому концентрація пилу  $C_{\text{п}}$  визначається по формулі:

$$C_{\text{п}} = \frac{M_1 - M_2}{V}, \quad (1)$$

де  $M_1$ , мг – маса фільтра з пилом,  $M_2$ , мг – маса фільтру без пилу,  $V$  – об'єм пропущеної проби, м<sup>3</sup> [9].

Основним недоліком гравіметричного способу є методична похибка вимірювання, яка виникає внаслідок динамічних змін концентрації пилу, зважуванні на електронних терезах пилового фільтру. Старіння елементів схе-

ми терезів, умови експлуатації, зовнішні чинники температури, тиску та інших параметрів також впливають на результат вимірювання терезів, внаслідок коливання коефіцієнта передачі терезів.

Таблиця 2. Технологічні нормативи викидів пилу із стаціонарних джерел

№	Виробничий процес	Технологічні нормативи викидів суспендованих частинок – пил	
		Поточні мг/м <sup>3</sup>	Перспективні мг/м <sup>3</sup>
1	Теплосилові установок, потужністю більше 50 мВт	400-2000 (вугілля) 5-50 (газ)	30-50 (вугілля) 5-10 (газ)
2	Виробництва цементного клінкеру 500 тонн на день.	50-1200	50
3	Виробництво нормального електрокорунду	260	50
4	Котельні, що працюють на лушпинні соняшнику	100-600	50-100
5	Коксові печі	50-800	35-50
6	Устаткування установки для випалювання та агломерації металеві руди.	190-980	50
7	Устаткування (установки) для плавки феросплавів.	20-150	20
8	Устаткування (установки) для виготовлення скла, 20 тонн на добу.	100	10
		Метали (кадмій, кобальт, нікель, селен, хром, свинець)	
		5,0	1,0-5,0

Гравіметричний метод по данному ГОСТ обмежений діапазоном вимірювання концентрації пилу 0-10 мг/м<sup>3</sup> і тому його доречно використовувати в першу чергу для санітарно-гігієнічного контролю атмосфери, атестації робочих місць. Для виконання вимірювань вмикають аспіратор і встановлюють необхідну витрату повітря:

75 дм<sup>3</sup>/хв – для фільтра з робочою площею 20 см<sup>2</sup>;

150 дм<sup>3</sup>/хв – для фільтра з робочою площею 40 см<sup>2</sup>;

100 дм<sup>3</sup>/хв – для фільтра з робочою площею 160 см<sup>2</sup>.

По закінченню відбору проб аспіратор вмикають та реєструють загальний обсяг пропущеного повітря. Фільтр з відібраною пробою обережно складають та кладуть до пакету для подальшого вагового вимірювання. Рекомендована похибка вимірювання даного методу складає 25%. Важливою умовою використання гравіметричного методу є стабільність і незмінність концентрації пилу,

швидкі динамічні змінні газового потоку гравіметричним методом вимірювати практично неможливо.



Рис. 1. Вітчизняний пристрій для відбору проб пилу «ПРОБА»

Прокачувальний пристрій «ПРОБА» (рис. 1) призначений для відбору пилогазових проб з джерел промислових викидів, повітря робочої зони, атмосферного повітря та прокачування із заданим об'ємною витратою заданого обсягу газової проби через пилевідбірні трубки та інші пристрої.

#### Технічні характеристики

Витрата, л/хв	від 1 до 25
Об'єм прокачуваної пилегазової проби, л	від 1 до 6000
Похибка підтримки витрати, %	±5
Ціна одиниці молодшого разряду витратоміра газу, л/хв	0,1
Потребляемая електрична потужність, Вт, не більше	15
Габаритні розміри, мм, не більше 240x255x110	
Маса, кг, не більше	5

До основних недоліків даного приладу слід віднести: тривалий цикл вимірювань, недостатня потужність електродвигуна, обмежена ємність акумуляторної батареї. Також важливою проблемою є забруднення пилових фільтрів. Проблема автоматичної очистки пилових фільтрів і автоматизація процесу очистки досліджена автором в роботах [10, 11].

#### Фотометричний метод вимірювання пилу

Фотометричний метод заснований на вимірюванні ослаблення інтенсивності випромінювання за рахунок його поглинання частинками пилу, або на реєстрації розсіяного світлового потоку, відбитого від цих частинок.

На рис. 2 представлено оптичний пиломір типу ВОГ-2 українського виробника [4] як найбільш типовий, по аналогічному принципу будуються пиломіри російського виробника: ИКВЧ «Аналітприлад» (Смоленськ), Gravimat SHC 500, фірма ZIK (ФРН).

Принцип дії вимірювача ВОГ-2 (рис. 1) полягає у вимірюванні зміни значення



значення  $I_0$ . Це значення  $I_0$  використовується при подальших вимірах як значення сигналу при відсутності пилу в вимірювальному каналі. Після відкриття заслінки і встановлення показів приладу з фотоприймача зчитується значення сигналу  $I_U$ .

Далі розраховується значення оптичної щільності аналізованого газового потоку за формулою:

$$D_U = \lg \frac{I_0}{I_U}. \quad (2)$$

Концентрації пилу за формулою:

$$C = \alpha \cdot \beta(T) \cdot C_M \cdot \frac{D_U}{D_M}, \quad (3)$$

де:  $\alpha$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від властивостей пилу, що проходять через пиломір частинок пилу;  $\beta(T)$  – емпіричний коефіцієнт, що визначається умовами вимірювання;  $C_M$  – індекс, що відповідає калібруванню пиломіра «масовим» методом, а  $D_M$  і  $C_M$  – відповідно значення оптичної щільності каліброваного потоку газу і концентрації пилу в цьому потоці;  $D_U$  – оптична щільність досліджуваного пилового потоку газу.

За рахунок введення коефіцієнтів  $\alpha$ ,  $\beta$  показання пиломіру залишаються стабільними протягом тривалого часу.

Оптичні пиломіри дозволяють швидко провести вимірювання значних концентрацій пилу до  $2000 \text{ мг/м}^3$ . Основною проблемою оптичних методів є методична похибка пов'язана з тим, що фактично вимірюється не масова концентрація пилу у  $\text{мг/м}^3$ , а щільність пилогазового потоку, яка є функцією концентрації і її треба визначати для кожного виду пилу окремо і відповідно проводити калібрування по гравіметричному методу. Найчастіше оптичні пиломіри використовуються в теплоенергетиці, металургії.

### Трибоелектричний метод

Метод заснований на вимірюванні електричного заряду, що виникає при взаємодії рухаючих в газовому потоці пилових часток з датчиком-стержнем. Пилові частинки з концентрацією  $0\text{-}150 \text{ мг/м}^3$  при переміщенні відносно датчика-стержня створюють у ньому індукційний заряд, яке перетворюється підсилювачем заряду в напругу, пропорційну вмісту пилу в газовому потоці. Напруга надходить на мікропроцесор для аналізу відповідно до програми, після чого проводиться індикація показань вмісту пилу на цифровому індикаторі, включення і виключення світлової сигналізації при спрацьовуванні порогових пристроїв, видача інформації на струмовий вихід і канал зв'язку RS485 (протокол MODBUS RTU).

Цей метод використовується для вимірювання пилу у викидах цементного виробництва, перевалці сипучих матеріалі і також потребує гравіметричного калібрування.

### Електродинамічний метод

При електродинамічному методі контроль масової концентрації пилу відбувається шляхом визначення на вимірювальному електроді наведеної індукції, що служить мірою загального заряду частинок, що проходять поблизу зонда. Використовується при вимірюванні концентрації пилу в металургії, агломерації, виробництві скла в діапазонах 200-1000 мг/м<sup>3</sup>.

### Двухтактний інваріантний метод вимірювання пилу

Для зменшення похибки вимірювання і розширення можливостей гравіметричного методу для вимірювання концентрацій пилу у діапазоні: 0-1000-2000 мг/м<sup>3</sup> запропоновано двухтактний інваріантний метод вимірювання пилу, що суттєво розширює діапазон вимірювання зменшує похибку [12].

Згідно розробленого методу з джерела викиду 1 – димової труби котельні, (печі) димовий газ з пилом, через пробовідбірний зонд 2, на якому встановлено пиловий фільтр 3, через вимірювач витрат димової проби – ротаметр 4, відбирається збудником витрат (насосом) 5.

Концентрацію пилу  $C_{\Pi}$  у джерелі викиду визначають по формулі:

$$C_{\Pi} = \frac{M_1 - M_2}{V}, \quad (4)$$

де  $M_1$ , мг – маса фільтра з пилом,  $M_2$ , мг – маса фільтру без пилу,  $V$  – об'єм пропущеної проби, м<sup>3</sup>.

Перед початком робіт на терезах вимірюють вагу пилового фільтру 3 без пилу, за результатами вимірювання фіксують вагу фільтру без пилу –  $M_2$ . Далі визначення маси  $M_1$  пилового фільтру з пилом, виконується прокачування фіксованого об'єму димової проби з пилом з джерела викиду 1, через фільтр пиловий 3, за допомогою збудника витрат 5, при контролі витрат проби ротаметром 4. Фільтр пиловий 3 після прокачування димової проби з пилом і масою  $M_1$  виймається з пробовідбірного зонду 2 і передається до зважування на цифрових терезах.

Зважування відбуваються в два такти:

У першому такті на цифрових електронних терезах розміщують пиловий фільтр 3 з пилом і фіксують значення показів терезів  $N_1 = M_1 K$ , де  $K$  – коефіцієнт передачі терезів.

У другому такті до пилового фільтру на терезах додають еталонну вагову міру масою  $M_0$  і фіксують результат вимірювання  $N_2 = K \cdot (M_0 + M_1)$  – сумарної маси пилового фільтру з пилом і еталонної вагової міри. (У якості еталонної міри використовується калібрована вага – міні гиря, вагою у діапазоні 50-100 мг.)

Складається і вирішується система рівнянь:

$$\begin{cases} N_1 = K \cdot M \\ N_2 = K \cdot (M_1 + M_0) \end{cases} \quad (5)$$

далі визначають  $M_1$  по формулі:



$$M_1 = \frac{N_1 \cdot M_0}{N_2 - N_1} \quad (6)$$

Розраховане значення  $M_1$  вводиться в формулу (4).

При визначенні концентрації  $M_1$  по формулі (4) відхилення коефіцієнта  $K$  передачі терезів від номінального значення, внаслідок дії зовнішніх чинників, взаємно компенсується, якщо обидва такти провести з мінімальним розривом у часі.

Запропонований спосіб забезпечує інваріантність (незалежність) вимірювання  $M_1$  від дестабілізуючих факторів. При вимірювання маси пилового фільтру з пилом відхилення коефіцієнта передачі терезів  $K$  від номінального значення не приводять до похибки вимірювання. При цьому зміни коефіцієнта передачі терезів під дією зовнішніх чинників компенсуються за рахунок використання еталонної вагової міри і алгоритму обробки результат вимірювання у двох тактах, підвищується точність, зменшується похибка вимірювання. Похибка вимірювання від дестабілізуючих факторів повністю компенсується, основна приведена похибка вимірювань при цьому, не перевищує  $\pm 3\%$ .

### Висновки

Висока чутливість, практична безінерційність і безперервність вимірювань роблять оптичні та електричні методи незамінними при отриманні миттєвих значень концентрації пилу в промислових викидах, виявленні причин аварій на технологічному обладнанні.

Трибоелектричний метод дешевший за оптичні прилади, але ряд недоліків: калібровка приладів залежить від швидкості, типу та розмірів частинок, низька надійність при роботі у вологому середовищі, вплив передчасної зарядки від електростатичних осаджувачів обмежують можливості методу в ряді технологічних процесів особливо в теплоенергетиці і потребують постійного гравіметричного калібрування.

Переваги електродинамічного методу – відсутність впливу швидкості (для частинок, що мають розмір менше 80 мкм), відсутність дрейфу нуля. До недоліків можна віднести вплив передчасної зарядки від електростатичних осаджувачів.

Гравіметричний метод, визнаний арбітражним (референтним), частіше використовують для калібрування і періодичної перевірки автоматичних аналізаторів пилу, діагностики ефективності пиловловлюючого устаткування, проведенні арбітражних аналізів і контрольних метрологічних перевірок, особливо при застосуванні двухтактного інваріантного способу обробки результатів вимірювання.

### Література

1. Соломічев Р. І. Розробка та обґрунтування структури вимірювальної системи контролю вибухонебезпечних пило-газових сумішей в шахтному виробітку / Р. І. Соломічев, О. В. Вовна, А. А. Зорі // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Збірник нау-

- кових праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – Харків, 2014. – № 19 (1062). – С. 154 – 163.
2. Балтренас П. Б. Моделирование процесса переноса пылевых смесей из потока воздуха в радиальном направлении / П. Б. Балтренас, Б. П. Мартиеннас // Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнений. – К., 1983. – Вып. 9. – С. 58 – 60.
  3. Семенов В. В. Результаты компьютерного моделирования оптических пылемеров для контроля концентрации угольной пыли / В. В. Семенов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2001. – № 3. – С. 23 – 24.
  4. Максименко Ю. Н. Переносной оптический пылемер ВОГ – 2. / Ю. Н. Максименко, Е. Г. Мазан, А. К. Тимин // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. – 2010. – Вип. 40 – С. 81 – 86.
  5. Трубицын А. А. Разработка прибора контроля запыленности воздуха ПКА-01 для предприятий угольной промышленности / А. А. Трубицын, Д. Н. Козлов, А. Ю. Ермаков // Взрывное дело. – 2005. – Вып. № 95/92. – С. 121 – 129.
  6. Державні санітарні правил охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними і біологічними речовинами)", ДСП-201-97, затверджені наказом МОЗ України від 09 липня 1997р. №201
  7. Постанова КМУ №1780 від 28.12. 2001р. «Про затвердження Порядку розроблення та затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел.
  8. Корнієнко Д. Г. Технологічні нормативи допустимих викидів забруднюючих речовин і їх інструментальний контроль / Д. Г. Корнієнко, В. П. Приміський, В. М. Івасенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків. – 2014. – № 3. – С. 8 – 15.
  9. ГОСТ ГОСТ 17.2.4.05-83 Охрана природы. Атмосфера. Гравиметрический метод определения взвешенных частиц пыли.
  10. Пат. України № 98234 G01N 1/22. Система пилової очистки пробо підготовки газоаналізаторів / Д. Г. Корнієнко // Бюл. винаходів – 2015. – № 8.
  11. Корнієнко Д. Г. Автоматична система очистки пробопідготовки газоаналізаторів димових газів / Д. Г. Корнієнко, В. П. Приміський // Технологический аудит и резервы производства. Харків. – 2015. – № 1/3(21). – С. 29 – 32.
  12. Заявка на винахід а201507363 від 22.07.2015р. «Гравіметричний спосіб вимірювання концентрації радіоактивного пилу у викидах стаціонарних джерел».

*Надійшла до редакції  
20 липня 2015 року*

© Корнієнко Д. Г., 2015