

**В.С. Антонюк, д.т.н., проф.****Ю.Г. Мережаний, асист.***Національний технічний університет України «КПІ»*

## **ВИМІРЮВАННЯ АЕРОЗОЛЬНИХ ЧАСТОК У ПОВІТРІ В УМОВАХ СКЛАДАЛЬНОГО ПРИМІЩЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Розглянуто сучасні методи та обладнання для проведення вимірювань кількості аерозольних часток у повітрі виробничого приміщення складального цеху, проаналізовано методики побудови контрольно-вимірювальних систем, висвітлено специфіку технологічних процесів складання прецизійних приладів, дано рекомендації щодо покращення якості виконання прецизійних операцій складання та регулювання приладів.*

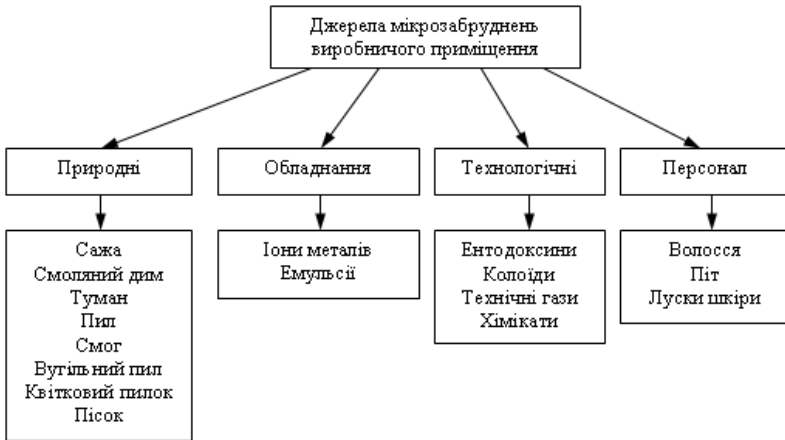
**Вступ.** Атмосферне повітря містить дисперговані в ньому частки – так звані аерозолі. Повітря містить частки, що утворилися в результаті як природних процесів, так і діяльності людини. У природі аерозольні частки утворюються в ході атмосферних процесів, що впливають на погоду, при вітрової ерозії, при виверженнях вулканів, при лісових пожежах і через інші численні причини. У природних аерозолях переважно дрібні частки: концентрація часток діаметром 0,1 мкм в 1000 разів перевищує концентрацію часток діаметром 1 мкм. Промислове виробництво й щільність населення істотно впливають на концентрацію часток у повітрі, при цьому домінуючими джерелами є транспортні потоки (особливо дорожній рух), повітряні й теплові викиди підприємств. Результатом дії всіх цих факторів є те, що залежно від таких факторів, як погода й щільність населення, в одному кубічному метрі атмосферного повітря утримується від 10 мільйонів до 10 мільярдів (а іноді й більше) часток з розмірами більше 0,5 мкм [1–3].

У складальному приміщенні приладобудівного виробництва міститься велика кількість як живих, так і неживих аерозольних часток, які відрізняються по своїй природі та розмірам. Забруднення виділяються персоналом, обладнанням, устаткуванням, конструкціями і перегородками всередині приміщення, проникають із навколишнього середовища.

Для прецизійного приладобудівного виробництва розподіл мікрозабруднень відбувається таким чином: на технологічний процес припадає близько 25 % мікрозабруднень, обладнання – 25 %,

технологічні гази й хімікати – 8 %, повітря – 8 %, персонал – 35 %, причому вплив персоналу знижується із впровадженням спеціальних ізолюючих технологій [1].

На основі проведеного аналізу запропоновано класифікацію джерел мікрозабруднень, яку представлено на рисунку 1.



*Рис. 1. Джерела мікрозабруднень виробничого приміщення*

**Постановка задачі.** Вимоги до параметрів мікроклімату виробничого приміщення визначаються технічними умовами, технологічними процесами (регламентами), або угодою між замовником продукції та постачальником. Для створення необхідних умов мікроклімату використовуються спеціальні «чисті приміщення». Важливою характеристикою чистого приміщення є його клас чистоти. Клас чистоти приміщення характеризується класифікаційним числом, що визначає максимально допустиму рахункову концентрацію аерозольних часток певних розмірів в 1 м<sup>3</sup> повітря [4]. Для приладобудівної галузі найчастіше використовуються чисті приміщення класу чистоти від 8 ISO до 5 ISO [1].

Ключовим моментом є те, що чисті приміщення характеризуються саме рахунковою концентрацією часток, тобто числом часток в одиниці об'єму повітря, розміри яких рівні або перевищують певну величину (0,1; 0,3; 0,5 мкм та ін.). Цим вони відрізняються від звичайних приміщень, у яких чистота повітря оцінюється по масовій концентрації забруднень у повітрі. Звідси випливають особливості

підтримки й визначення показників чистоти, специфічні вимоги до контрольних приладів, лічильників часток у повітрі тощо.

Ціль контролю параметрів мікроклімату чистих приміщень – перевірити відповідність чистого приміщення заданому класу. Ця робота виконується як на етапі атестації чистого приміщення, після завершення пуско-налагоджувальних робіт, так і в період експлуатації.

Основні причини контролю параметрів мікроклімату чистого приміщення можна поділити на три категорії [5]:

- сертифікація;
- кваліфікація;
- моніторинг.

Роботи по сертифікації та кваліфікації чистого приміщення призначені для визначення класу чистоти приміщення і виконуються до запуску виробництва. При сертифікації та кваліфікації неможливо дослідити вплив параметрів мікроклімату на технологічний процес, та на якість і надійність вихідної продукції.

Слід також зазначити, що проблема створення спеціального мікроклімату чистого приміщення носить комплексний характер. Недостатньо лише створити власне чисте приміщення, що забезпечує необхідні технічні вимоги технологічного процесу. Потрібно одночасно застосовувати обладнання та устаткування, що виділяє мінімум забруднень або не виділяє їх взагалі, одягти людей в спеціальний одяг, що непорошить, навчити персонал правильно поводитися в приміщенні, встановити контроль за гігієною персоналу, та постійно проводити контроль стану виробничого приміщення. В іншому випадку значні витрати на створення приміщень з підвищеним класом чистоти не будуть мати сенсу.

**Вирішення поставленої задачі.** Аналіз літератури [1, 3, 5-8] показує, що існує декілька методів контролю чистоти виробничого приміщення. До найбільш розповсюджених методів можна віднести:

- контроль чистоти повітря за допомогою горизонтально розташованої пластини;
- контроль чистоти повітря за допомогою приладів серії АЗ;
- контролю кількості аерозольних часток в повітрі дискретним оптичним лічильником часток.

Контроль чистоти повітря за допомогою горизонтально розташованої пластини вважається один з найстаріший методів. Суть методу полягає у візуальному контролі кількості часток, що опадають на контрольне скло протягом певного часу, на одиницю площі. До переваг методу можна віднести його простоту, мінімальну кількість необхідного обладнання та його невелику вартість. До недоліків

методу слід віднести його малу продуктивність при виконанні робіт вручну та відсутності засобів автоматизації.

Метод контролю чистоти повітря приладів серії АЗ заснований на реєстрації розсіяного оптичного випромінювання. Цей метод використовується для атестації робочих місць і визначення класу чистоти чистих приміщень відповідно до стандарту ISO 14644-1 у хімічній, фармацевтичній промисловості, при виробництві напівпровідникових приладів і мікросхем. До суттєвих недоліків методу можна віднести малу роздільну здатність контролюючого обладнання, яке може вимірювати лише аерозольні частки розміром від 0,3 до 10 мкм [9].

Найбільш перспективним вважається контроль кількості аерозольних часток в повітрі методом відбору проб дискретним оптичним лічильником часток, який працює на принципі розсіювання світла [1, 2]. Цей метод широко застосовується в сучасному виробництві. До переваг методу можна віднести його відносну простоту, продуктивність і велику розповсюдженість. До недоліків методу слід віднести те, що даний метод дає можливість лише підраховувати кількість часток певного розміру (0,1; 0,3; 0,5 мкм і т.д.), проте не має можливості безпосередньо вимірювати розмір часток.

Для контролю чистоти повітря чистого приміщення застосовують лічильники аерозольних часток. Важливими технічними характеристиками лічильників є чутливість та об'ємна швидкість потоку повітря через прилад (л/хв.), оскільки ці обидві характеристики впливають на ефективність і час проведення вимірювань. В менш чистих зонах також варто враховувати гранично допустиму для нормальної роботи лічильника концентрацію часток мікрозабруднень в повітрі. Лічильники аерозолів, що використовуються для проведення контролю в чистих приміщеннях, зазвичай мають чутливість 0,1 мкм; 0,3 мкм; 0,5 мкм. Чим вища чутливість лічильника, тим більш малі частки він зможе зафіксувати, і відповідно підрахувати більшу кількість часток. Чим вища швидкість пробовідбору, тим більший об'єм проби буде прокачаний через лічильник, і відповідно більша кількість часток пройде через вимірювальний об'єм лічильника. Як наслідок, за певний період часу буде накопичено більше даних про стан запиленості приміщення. Проте у випадку, коли концентрація часток занадто велика, це може призвести до того, що на промінь лазера може потрапити одночасно не одна, а декілька часток, і це може призвести до спотворення результатів вимірювання.

При виконанні прецизійних механоскладальних робіт, в чистому приміщенні необхідно контролювати чистоту повітря у великій кількості критичних точок. Використання лічильників часток для цього випадку є не раціональним, оскільки проведення вимірювань займає великий об'єм часу. Для вирішення цієї задачі на виробництві застосовуються так звані датчики аерозолів. На відміну від «звичайних» лічильників, датчики аерозолів, як правило, не мають пневматичної системи, тобто прокачування аналізованого повітря через вимірювальний обсяг приладу здійснюється за рахунок зовнішнього джерела розрідження (вакуумного насоса), зазвичай, одного для всієї системи. Крім того, електронний блок датчика максимально спрощений – фактично він тільки підсилює сигнал з фотоприймача, що входить до складу оптичного блоку, і перетворює його у форму (аналогову або цифрову), необхідну для його передачі до системи керування та подальшої обробки. Обробка інформації і її відображення (у формі залежності концентрації часток від часу або у вигляді гістограми розподілу часток по розмірах) здійснюється системою керування або комп'ютером з відповідним програмним забезпеченням.

Одна з найважливіших задач систем контролю мікроклімату – це періодичний моніторинг стану мікроклімату в межах чистого приміщення або чистої зони (боксу, мікробоксу, ізолятора).

Структура системи контролю стану чистоти виробничого приміщення залежить від поставленого завдання, типу використаних датчиків й особливостей самого чистого приміщення. Сучасні автоматизовані системи контролю параметрів чистих виробничих приміщень містять у собі не тільки датчики аерозолів. Як правило, в системах контролю мікроклімату, що розроблюються на базі комп'ютерних систем, намагаються використовувати принцип відкритої архітектури, чим забезпечується можливість підключення датчиків будь-яких інших параметрів мікроклімату. До числа характеристик чистого приміщення, які можуть контролюватися системами контролю, відносяться [1, 8, 10, 11]:

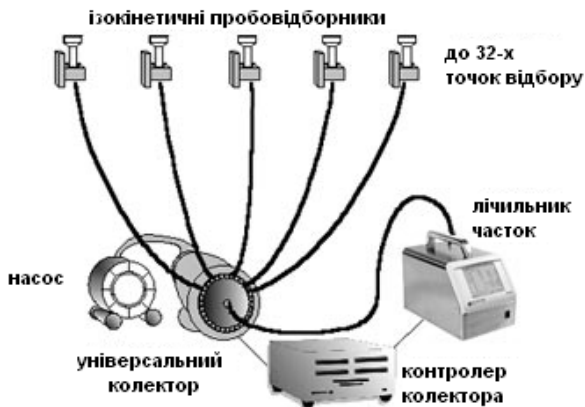
- температура й вологість повітря;
- перепад тиску між приміщеннями;
- швидкість повітря в приміщенні або у повітроводі;
- ефективність повітряних фільтрів;
- наявність часток аерозолів у магістралях технологічних газів;
- наявність часток у технологічних рідинах;
- наявність електростатичних зарядів;
- наявність у повітрі окремих летючих молекулярних забруднень.

Контроль останніх трьох параметрів часто виноситься в окремі підсистеми контролю. До складу системи контролю зазвичай включається певна кількість датчиків, рівна числу точок контролю плюс один датчик у якості резервного (використовується також для заміни основних датчиків при проведенні калібрування); програмне забезпечення; вакуумний насос; блок живлення датчиків [12]. В систему контролю дуже часто включаються кінцеві вимикачі, що показують стан того або іншого елемента устаткування або приміщення, наприклад, дверей. Таким чином, з'являється можливість легко встановити взаємозв'язки між змінами контрольованого параметра й станом приміщення. Класичним прикладом є пряма кореляція між відкриванням дверей приміщення, перепадом тиску та рівнем чистоти повітря в приміщенні. Іншим елементом, що часто зустрічається в системах контролю, є сигнальні пристрої, які включаються при перевищенні контрольованим параметром заданого рівня. Втім, у конструкції багатьох аерозольних датчиків (наприклад, Remote x012, x014, x104 фірми Lighthouse) передбачений спеціальний канал, що включає зовнішній сигнальний пристрій без участі центрального комп'ютера, що ще більше підвищує оперативність і гнучкість системи контролю [10, 12]. Найпростіша система контролю мікроклімату реалізується на базі одного лічильника аерозольних часток, що послідовно переміщується в різні точки відбору проб повітря. Недоліком такої системи є великі затрати часу на отримання проб з усіх точок відбору і великі інтервали часу між отриманням проби з однієї точки відбору. Як наслідок – мала інформативність та оперативність системи.

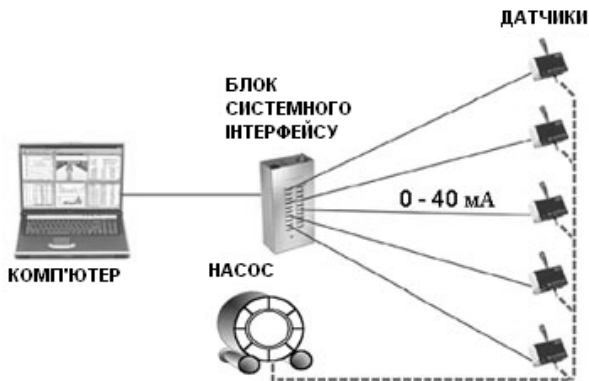
Більш ефективними є створення системи контролю на основі послідовного відбору проб (рис. 2) при якому вимірювання проводяться лише одним стаціонарно встановленим приладом, та використанням колектору. При такій реалізації можливо послідовно опитувати до 32 точок відбору проб. Проте навіть при такому підході, інтервал відбору проби в одній точці може бути доволі великим – від 10 до 36 хвилин, що знов таки негативно відображається на оперативності контролю [13].

Іншою реалізацією системи є встановлення датчиків аерозольних часток в кожену точку відбору проб (рис. 3), які періодично (або безперервно) контролюють стан мікроклімату приміщення в кожній точці відбору проб одночасно. Швидкодія та оперативність реакції системи при цьому різко підвищується. До недоліків такої організації системи контролю можна віднести велику вартість обладнання, проте у випадку використання системи в межах невеликих виробничих площ

(наприклад, в боксі або мікробоксі), вартість обладнання стає прийнятною.



*Рис. 2. Система контролю чистоти приміщення на основі послідовного відбору проб*



*Рис. 3. Система контролю чистоти приміщення з паралельним використанням датчиків аерозольних часток*

При паралельному використанні датчиків аерозольних часток стає можливим їх використання одночасно в декількох критичних точках виробничого процесу, при цьому лічильники працюють в режимі неперервного моніторингу [14].

В якості альтернативної побудови системи можливий проміжковий варіант. Така побудова фактично дублює систему послідовного

відбору з колектором з відмінністю в тому, що додатково використовується ще один лічильник аерозолів. Перший лічильник при цьому контролює стан повітря в поточній точці відбору проби, а другий – в решті точок. Таким чином досягається послідовний контроль наявності часток бруду в кожній точці відбору проб і одночасно контролюється стан загального потоку повітря в приміщенні. Система є вигідною при використанні у великих чистих приміщеннях або комплексах, оскільки є більш оперативною ніж система послідовного відбору проб і при цьому значно дешевшою ніж система з паралельним використанням великої кількості датчиків аерозолів. До недоліків такої системи можна віднести те, що в разі виявлення підвищеного забруднення приміщення в загальному потоці повітря неможливо точно і оперативно визначити, де саме відбулося забруднення, і швидко ліквідувати його джерело.

В умовах прецизійного складального виробництва при контролі мікроклімату в межах мікоробоксу або ізолятора, можливе використання мініколектора. При цьому забезпечується моніторинг в різних точках одного мінісередовища і чітко контролюється концентрація аерозольних часток. Недоліком такої системи є те, що максимально можлива кількість точок відбору на один мініколектор не перевищує шести, що значно обмежує область застосування такої системи.

**Особливості вимірювання чистоти приміщення в умовах прецизійних механоскладальних операцій.** Специфіка прецизійного механоскладального приладобудівного виробництва полягає в тому, що для раціонального використання робочого часу та виробничих площ неможливо чітко розділити технологічні операції складання, регулювання та доводки. Це призводить до того, що технологічні потоки, для яких необхідні різні класи чистоти, перетинаються, що в свою чергу ускладнює процес розробки систем контролю. Під час виготовлення прецизійного приладу використовується велика кількість технологічного устаткування, в тому числі обладнання для механічної обробки елементів приладу, яке є додатковим забруднюючим джерелом аерозольних часток.

Такі складні умови для проведення вимірювання та контролю вимагають великої швидкодії системи контролю для збору вхідної інформації та подальшої її обробки, з метою створення необхідних умов технологічного процесу, що забезпечує якість вихідної продукції. Але чим більше та складніше складальне виробництво, тим необхідно контролювати більшу кількість контрольних точок, що призводить до збільшення затрат часу збору та обробки отриманих результатів. До



того ж точки контролю чистоти повітря повинні знаходитись в зонах з різним класом чистоти, що вимагає використання аерозольних датчиків з різним порогом чутливості та швидкодії.

**Висновки.** Аналіз систем контролю мікроклімату, та обладнання, що застосовується системах контролю мікроклімату, показав, що в межах виробничого приміщення, призначеного для виконання прецизійних операцій складання, затратні по часу системи моніторингу та керування параметрами мікроклімату приміщення можуть бути замінені більш раціональними, з точки зору технологічності та експлуатаційних характеристик, а також енергоємності і швидкодії системами, що засновані на автоматизованому мікропроцесорному керуванні, з елементами логіки, які включають компоненти, що не допускають порушень технологічного процесу через наявність забруднень, або що сигналізують про можливість забруднення, чи прогнозують таку можливість, стан її розвитку та вплив забруднення приміщення на технологічний процес. Таким чином, чітко визначається напрямок наукових досліджень по розробці методів контролю параметрів мікроклімату виробничого приміщення, та прогнозування можливих критичних ситуацій для технологічного процесу з розробкою автоматизованої системи, яка забезпечує контроль необхідних технічних умов для прецизійних технологічних процесів складання. Науково обґрунтовані методи поліпшення точності контролю параметрів мікроклімату, а також прогнозування критичних ситуацій технологічного характеру дозволять забезпечити необхідний результат по надійності та довговічності продукції, що випускається на прецизійному складальному виробництві.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Чистые помещения / *А.А. Абрамов, А.Е. Федотов, Г.Г. Шихт и др.* ; под ред. *А.Е. Федотова*. – 2-е изд. – М. : АСИНКОМ, 2003. – 576 с.
2. Cleanroom Design / Edited by *W.White*. – U. : John Wiley & Sons, England. – 1999. – С. 305.
3. Проектирование чистых помещений / *О.Ф. Алексашин, М.В. Балаханов, В.И.Власенко и др.* ; под ред. *В.Уайта* ; пер. с англ. ; под ред. *В.И. Калечица*. – М. : Клинрум, 2004. – 360 с.
4. Чистые помещения / Под ред. *И.Хаякавы* ; пер. с яп. – М. : Мир, 1999. – С. 454.
5. Выбор наиболее подходящего расположения точек отбора проб для взвешенных в воздухе частиц, не являющихся микроорганизмами // Чистые помещения и технологические

- среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2008. – № 4. – С. 12–13.
6. Контроль загрязнений в минисредах и изоляторах. // // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2004. – № 4. – С. 36–38.
  7. Очистка воздуха в вентиляционных системах общего назначения // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2004. – № 3. – С. 21–25.
  8. Современные направления в контроле аэрозольных микрозагрязнений // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2002. – № 1. – С. 16–21.
  9. Контроль воздуха рабочей зоны. Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10 [Электронный ресурс] / Производственно-коммерческая группа "ГРАНАТ". – 2011. – Режим доступа : <http://granat-e.ru/az-10.html>.
  10. Автоматизированные системы контроля и управления параметрами микроклимата для чистых производственных помещений // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2002. – № 2. – С. 24–26.
  11. Системы контроля параметров чистых помещений и их соответствие CFR 21, Ч. 11 // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2004. – № 1. – С. 34–36.
  12. Cleanroom Instruments – Системы мониторинга [Электронный ресурс] / Клирум Инструментс. – 2011. – Режим доступа : <http://clri.ru/sistemy-monitoringa>.
  13. Компьютерные системы контроля параметров чистых производственных помещений // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2003. – № 4. – С. 23–31.
  14. Чистые помещения 2013 года // Чистые помещения и технологические среды (Cleanrooms & clean media) : научно-практ. журнал. – 2003. – № 4. – С. 4–8.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор  
Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:  
– нові технології;

– технологічні процеси складання приладів.

Тел.: 8(044) 454–94–75.

E-mail: vp@kiev.ua.

МЕРЕЖАНИЙ Юрій Григорович – асистент Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– нові технології;

– технологічні процеси складання приладів.

Тел.: 8(044) 454–94–75.

E-mail: vp@kiev.ua

Подано 17.06.2011