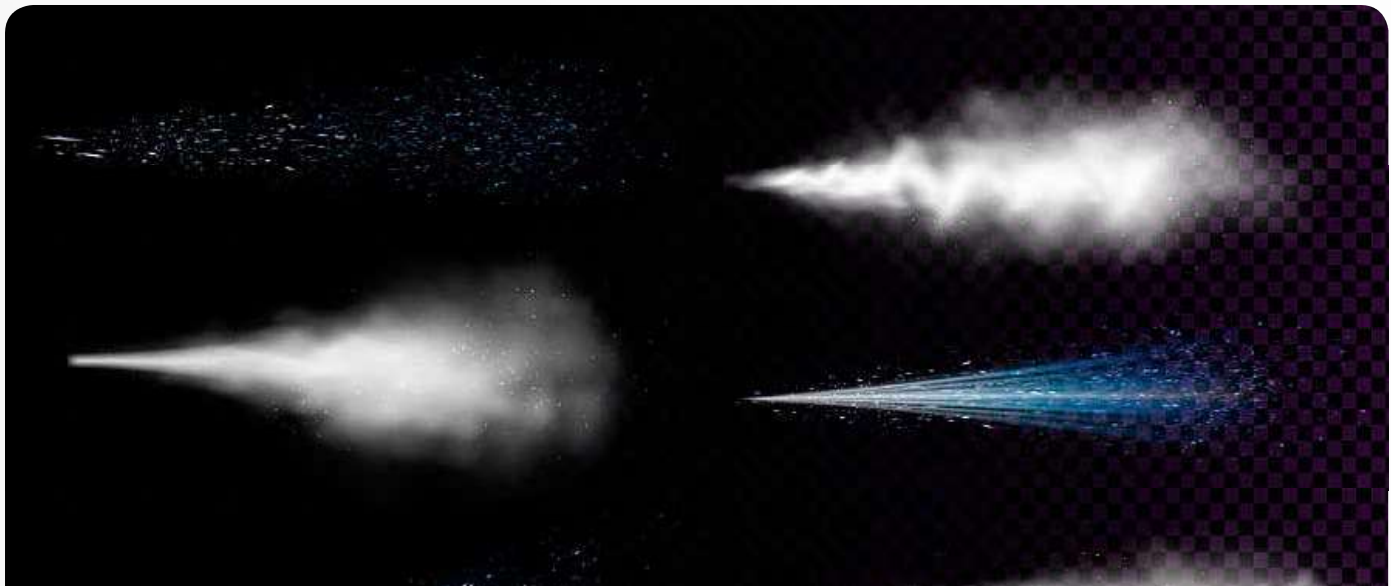


dr PRZEMYSŁAW OBERBEK (ORCID: 0000-0002-5225-3523)
 dr inż. SZYMON JAKUBIAK (ORCID: 0000-0002-8965-9527)
 Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: ober@ciop.pl; szjak@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0014.7491

Metody grawimetryczne i optyczne w pomiarach stężenia aerozoli



Zgodnie z danymi GUS o zatrudnionych w warunkach zagrożenia na koniec 2019 r., 2. pod względem częstości występowania czynnikiem szkodliwym były pyły, na które narażonych było 50,4 tys. osób (15,9%).

Ocena narażenia na pyły w środowisku pracy polega na wykonaniu grawimetrycznych pomiarów stężeń na stanowiskach pracy dla zidentyfikowanych rodzajów pyłów, określeniu wskaźników narażenia na pyły i porównaniu uzyskanych wartości wskaźników narażenia z wartościami najwyższych dopuszczalnych stężeń pyłów. Wadami metody grawimetrycznej jest m.in. brak informacji o zmianach stężenia w czasie, podatność na dodatkowe źródła emisji, długi czas potrzebny na uzyskanie wyniku.

Mierniki stężenia pyłów, przedstawiające dane pomiarowe w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego, znajdują coraz więcej zastosowań. Produkowane są już na dużą skalę niskokosztowe, niewielkie sensory, które można stosować do wytwarzania relatywnie dokładnych mierników środowiskowych, a także stacjonarnych i mobilnych sieci sensorowych. Tego typu urządzenia mogą stanowić istotne wsparcie dla grawimetrycznej oceny stężenia pyłów na stanowiskach pracy.

Słowa kluczowe: analiza grawimetryczna, ocena jakości powietrza, niskokosztowe sensory optyczne, systemy monitorowania zagrożeń, pomiary w czasie rzeczywistym

The use of optic and gravimetric methods relevant in aerosol concentration measurements

According to the data of the Statistics Poland on employees exposed to the risks arising from work environment at the end of 2019, the second most frequent harmful factor was dust, to which 50,4 thousand people were exposed (15,9%).

The assessment of exposure to dust in the work environment consists in performing gravimetric measurements of concentrations at workstations for the identified dust types, determining the dust exposure indicators and comparing the obtained exposure indicator values with the values of the maximum allowable dust concentrations. The disadvantage of the gravimetric method is the lack of information about changes in concentration over time, susceptibility to additional emission sources, long time needed to obtain the result and the inability to conduct continuous monitoring.

Dust concentration meters presenting real-time or near to real-time measurement data are finding more and more applications in monitoring of the external environment and working environment. Small low-cost sensors are already produced on a large scale, which can be used to produce relatively accurate environmental meters, as well as stationary and mobile sensor networks. Such devices are also not without flaws, but they can provide important support for the gravimetric assessment of dust concentration at workstations.

Keywords: gravimetric analysis, air quality assessment, low-cost optical sensors, systems for risks monitoring, real-time measurements

Wstęp

Środowisko pracy jest terminem określającym warunki środowiska materialnego (określonego czynnikami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi), w którym odbywa się proces pracy [1]. Wśród nich wyróżnia się te, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla zdrowia lub życia. Szkodliwość dla zdrowia danego czynnika fizycznego (np. hałasu, mikroklimatu zimnego, mikroklimatu gorącego, pola elektromagnetycznego itd.), pyłowego lub chemicznego zależy w znacznym stopniu od wartości natężeń i stężeń tych czynników w środowisku pracy [2]. Czynniki o charakterze uciążliwym, szkodliwym lub niebezpiecznym nie powinny przekraczać ustalonych przepisami prawa wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) i stężeń (NDS) w środowisku pracy [3,4]. Pracodawcy są prawnie zobowiązani [1,5,6] do dokonywania pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w regularnych, określonych odstępach czasu oraz ograniczania narażenia pracowników na te czynniki do poziomów nieprzekraczających wartości NDN i NDS.

W 2019 r. Główny Urząd Statystyczny (GUS) objął badaniami 82,4 tys. zakładów pracy zatrudniających 6,1 mln osób. W tej grupie 442,5 tys. osób pracowało w warunkach zagrożenia (7,3% zatrudnionych). Zgodnie z danymi GUS, drugim pod względem częstości występowania czynnikiem szkodliwym były pyły (zawarte w aerozolach), na które narażonych było 50,4 tys. osób (15,9%), [7]. Ich źródłem w środowisku pracy jest większość procesów technologicznych, do których należą m.in.: szlifowanie, ostrzenie, polerowanie, kruszenie, mieszanie, mielenie, przesiewanie, wydobycie surowców.

Narażenie pracowników na wysokie stężenie frakcji aerozoli (zawiesiny cząstek stałych, ciekłych lub stałych i ciekłych w fazie gazowej o pomijalnej prędkości opadania wg PN-ISO 4225), oprócz poczucia dyskomfortu, może powodować utratę zdrowia. Nawet krótkotrwała ekspozycja na wysokie stężenia tych frakcji o wielkościach w skali mikro powoduje wzrost liczby zgonów spowodowanych chorobami układu oddechowego i krążenia. Wielkość dawki wchłoniętej zależy m.in. od stężenia, czasu narażenia, prędkości i kierunku ruchu powietrza w otoczeniu człowieka oraz od szybkości oddychania. Wielkość wdychanych cząstek ma wpływ na miejsce depozycji oraz eliminację lub ich zatrzymanie w układzie oddechowym.

Zagrożenie zdrowia wynikające z fizycznego kontaktu z pyłami zawartymi w aerozolach zależy od ich właściwości, rozmiaru i stężenia w powietrzu. Gruboziarniste cząstki (tzw. frakcja wdychalna < 100 μm czy też frakcja PM10 < 10 μm) przenikają do płuc, ale głównie akumulują się w górnym odcinku dróg oddechowych, skąd są wydalane. Pył zawieszony drobny (tzw. frakcja respirabilna < 4,5 μm i frakcja PM2,5 < 2,5 μm) wnika głęboko do układu oddechowego, osiada na ściankach pęcherzyków płucnych, akumuluje

się i utrudnia wymianę gazową. Skutki zdrowotne działania aerozoli uwidaczniają się zwykle po okresie utajenia w postaci chorób dróg oddechowych, w tym zapalenia górnych dróg oddechowych, złośliwych nowotworów układu oddechowego (m.in. płuc, opłucnej i otrzewnej, nosa i zatok przynosowych), pylic, zwłóknień oraz patologicznego rozrostu tkanki łącznej [8]. Najmniejsze cząstki z frakcji PM 2,5 mogą także wnikać do tkanki śródmiąższowej, skąd mogą przedostawać się wraz z krwią do innych narządów [9].

Celem artykułu jest omówienie metod grawimetrycznych i optycznych w pomiarach stężenia aerozoli (i zawartych w nich pyłów), a także porównanie ich ze sobą.

Ocena narażenia na aerozole występujące w środowisku pracy

Zgodnie z rozporządzeniem MRPIPS z 12.06.2018 r. [4], uwzględniając zalecenia normy PN-EN 481:1998 i PN-ISO 7708:2001 [10]:

- frakcję wdychalną – zdefiniowano jako frakcję aerozolu wnikałą przez nos i usta, która po zdeponowaniu w drogach oddechowych stwarza zagrożenie dla zdrowia,
- frakcję respirabilną – zdefiniowano jako frakcję aerozolu wnikałą do dróg oddechowych, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej,
- frakcję torakalną – zdefiniowano jako frakcję aerozolu wnikałą do dróg oddechowych w obrębie klatki piersiowej, która stwarza zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze tchawiczo-oskrzelowym i obszarze wymiany gazowej (obecnie ma wyłącznie znaczenie dla oznaczania stężenia kwasu siarkowego(VI) w powietrzu, metoda oznaczania kwasu siarkowego(VI) we frakcji torakalnej opisana w publikacji).

Obecnie w Polsce ocena narażenia na aerozole polega na wykonaniu grawimetrycznych (filtracyjno-wagowych) pomiarów stężeń masowych na stanowiskach pracy w odniesieniu do zidentyfikowanych rodzajów aerozoli. Następnie określa się wskaźniki narażenia i porównuje uzyskane w ten sposób wartości z wartościami najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS-ów). Na tej podstawie prowadzona jest ocena ryzyka zawodowego oraz dobór środków ochrony przed aerozolami.

Problematyka analizy grawimetrycznej

Metoda grawimetryczna polega na przepuszczeniu badanego powietrza, ze znanym strumieniem objętości i w określonym czasie, przez próbnik odcinający odpowiednią frakcję (np. za pomocą impaktora, cyklonu) oraz znajdującą się w nim przegrodę filtracyjną (filtr, sączek, piankę itp.) w celu zatrzymania na filtrze aerozolu. Stężenie masowe frakcji aerozolu oblicza się jako stosunek masy aerozolu zatrzymanego na filtrze do objętości powietrza przepuszczonego przez filtr, zgodnie ze wzorem:

$$C_m = \frac{m_2 - m_1}{V} \cdot 1000$$

C_m – stężenie masowe badanego aerozolu, mg/m³
 m_2 – masa filtra po badaniu, mg
 m_1 – masa filtra przed badaniem, mg
 V – objętość zassanego powietrza podczas pobierania próbki, dm³.

Aktualizowane obecnie normy do oznaczania frakcji respirabilnej i frakcji wdychalnej aerozolu na stanowiskach pracy metodą grawimetryczną zawierają także we wzorze wartość średniej zmiany mas ślepych próbek, odejmowaną od różnicy mas filtra.

W praktyce, analiza grawimetryczna wymaga przygotowania filtrów, ich kondycjonowania, ważenia, następnie pobrania próbek w terenie, powrotu do laboratorium, ponownego kondycjonowania i ważenia. Taka kolejność działania i czas trwania poszczególnych etapów wpływają na wady metody, do których zalicza się: długi czas potrzebny na uzyskanie wyniku, brak informacji o zmianach stężenia w czasie, brak możliwości prowadzenia ciągłego monitoringu oraz podatność na warunki środowiskowe (na parametry powietrza, takie jak jego wilgotność względna, temperatura, prędkość i ciśnienie). Pierwsza z nich wynika z wymogu prowadzenia pomiarów przez co najmniej 75% czasu trwania zmiany zakładowej, która najczęściej wynosi 8 godzin. Przez ten czas pobiera się jedną próbkę (filtr z aerozolem), dla której wykonywane jest laboratoryjne oznaczenie masy aerozolu, a potem obliczane jest średnie stężenie z czasu pobierania. Taka metodyka uniemożliwia prowadzenie ciągłego monitoringu, a także stwierdzenie czy stężenie jest stałe czy zmienne w czasie. Ostatnią kwestią jest podatność na warunki środowiskowe, przez co jednego dnia z wysoką wilgotnością względną powietrza i wysoką temperaturą otrzymamy inny wynik niż kolejnego dnia, kiedy temperatura nagle spada, maleje wilgotność, a do tego zmienia się prędkość wiatru (co może się zdarzyć, np. zimą, w otwartej hali magazynowej).

Ponadto warto zauważyć, że metoda jest podatna na dodatkowe źródła emisji. Jeśli na stanowisku pracy emitowane są różne aerozole, to określenie konkretnej substancji chemicznej, do której NDS powinien być odniesiony wynik, może stanowić spore wyzwanie i wymagałoby dodatkowych analiz chemicznych składu próbki. Metoda grawimetryczna ma jednak zalety – jest stosunkowo prosta do wykonania, sprzęt do pobierania próbek jest niedrogi, a wynik analizy pokazuje rzeczywiste stężenie aerozolu na jakie narażony jest pracownik, niezależnie od składu mieszaniny aerozolu oraz jego gęstości.

Specyfika metod optycznych w pomiarach stężenia aerozoli

Możliwym uzupełnieniem metod grawimetrycznych jest stosowanie urządzeń do automatycznego pomiaru stężenia aerozoli, pracujących w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego. Sposób działania takich urządzeń oparty jest najczęściej na dyfrakcji światła na cząstkach zawieszonych w aerozolu (metody optyczne),

osłabieniu promieniowania β w wyniku depozycji aerozolu na przegrodzie filtracyjnej pomiędzy źródłem a detektorem oraz zmianie częstotliwości drgań wagi oscylacyjnej w wyniku depozycji na niej aerozolu. Spośród nich, metody optyczne są jednak najbardziej popularne, głównie ze względu na ceny urządzeń i prostotę obsługi. Mierniki oparte na dyfrakcji światła znajdują coraz więcej zastosowań w monitorowaniu środowiska zewnętrznego i środowiska pracy [11-16].

W optycznych licznikach cząstek (ang. *optical particle counters*), cząstki zawieszane w aerozolu zliczane są przez detektor sygnałów podczas każdego odbicia wiązki światła, zaś wielkość cząstek szacowana jest na podstawie intensywności odbitego światła. Dzięki temu otrzymujemy rozkład wielkości i stężenie liczbowe cząstek w jednostce objętości. Tego typu urządzenia również nie są pozbawione wad. Największym problemem jest przeliczenie stężenia liczbowego na stężenie masowe, które jest wymagane przez normatywy higieniczne. Ponieważ znany jest strumień objętości aerozolu, jaki przechodzi przez detektor, wielkość cząstek w danej frakcji oraz czas pomiaru, to do wyznaczenia stężenia masowego potrzebna jest jeszcze masa cząstek zawartych w aerozolu. Masę zebranych cząstek można określić ze wzoru:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot N$$

ρ – gęstość cząstek, g/cm³
 V – objętość cząstek, cm³
 r – promień cząstek, cm
 N – liczba cząstek.

Do wyznaczenia masy potrzebna jest jednak gęstość cząstek zawieszonych w aerozolu, a jednocześnie wzór zakłada, że zliczone cząstki danej frakcji są w miarę jednorodne i mają kształt kulisty. Odstępstwa od tych założeń nastroją wiele problemów analitycznych i dla uproszczenia nie są brane pod uwagę. Tak wyliczone stężenie masowe obarczone jest więc sporym błędem. Producenci mierników optycznych zakładają też jedną uniwersalną wartość dla gęstości. Ponieważ skład aerozolu jest uzależniony od dodatkowych źródeł emisji, a często ma na niego także wpływ niejednorodne środowisko zewnętrzne, więc takie założenie również wpływa na wielkość błędu pomiarowego. W przypadku długotrwałej eksploatacji sensorów dochodzi jeszcze problem stabilności mierników związanej z osadzaniem się zanieczyszczeń na elementach optycznych oraz zużywaniem się stosowanych jako źródła światła diod LED lub laserów.

Niewątpliwą zaletą optycznych liczników cząstek jest możliwość wyznaczenia za ich pomocą zależności stężenia liczbowego w czasie. Większość sensorów podaje dane co sekundę, co kilka sekund lub co minutę, dzięki czemu otrzymujemy chwilowe stężenie cząstek zawieszonych w aerozolu, które można następnie uśrednić dla dowolnego przedziału czasu. Możliwe jest więc śledzenie zmian stężenia w czasie, korelacja tych zmian z odbywającymi się czynnościami, etapami procesów, zmianami pogodowymi itd. Optyczne

liczniki ze względu na dość prostą konstrukcję są niewielkie i łatwo je przenieść, co w połączeniu z szybkim odczytem umożliwia detekcję dodatkowych źródeł emisji. Kolejną zaletą jest możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów, nie ma potrzeby pobierania, transportowania i kondycjonowania próbek.

Przykład pomiarów z zastosowaniem metody grawimetrycznej i optycznej

Jako przykład zastosowania metody grawimetrycznej oraz optycznej można wskazać pomiar wykonany przez pracowników Pracowni Aerozoli, Filtracji i Wentylacji Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB) podczas jednego z badań w zakładzie produkcyjnym.

Celem badania było określenie stężeń różnych frakcji aerozoli przy stanowisku pracy związanym z wycinaniem elementów stalowych (zawierających głównie żelazo). Na wycinarnie laserowej prowadzony był proces wycinania wewnątrz szczelnej obudowy, a wycięte elementy wyprowadzane były podajnikiem na odsoniętą paletę. Podczas swojej zmiany pracownik nie odchodził od urządzenia (poza przerwą obiadową). Przez 6 godzin pobierano próbki do analizy grawimetrycznej za pomocą próbnika CIS do frakcji wdychalnej i próbnika do frakcji respirabilnej (wyposażone w aspiratory widoczne na fot. 1.) zamontowanych na ubraniu pracownika w jego strefie oddychania.

Prowadzono także pomiar stacjonarny za pomocą spektrometru aerozoli o szerokim zakresie badawczym (fot. 2.) z sondą wyprowadzoną w po-



Fot. 1. Zestawy do pomiarów grawimetrycznych frakcji wdychalnej i respirabilnej
 Photo 1. Sets for gravimetric measurements of inhalable and respirable fractions



Fot. 2. Spektrometr aerozoli o szerokim zakresie
 Photo 2. Mini Wide Range Aerosol Spectrometer



Fot. 3. Termohigrometr do pomiarów parametrów powietrza
Photo 3. thermohigrometer for measuring air parameters

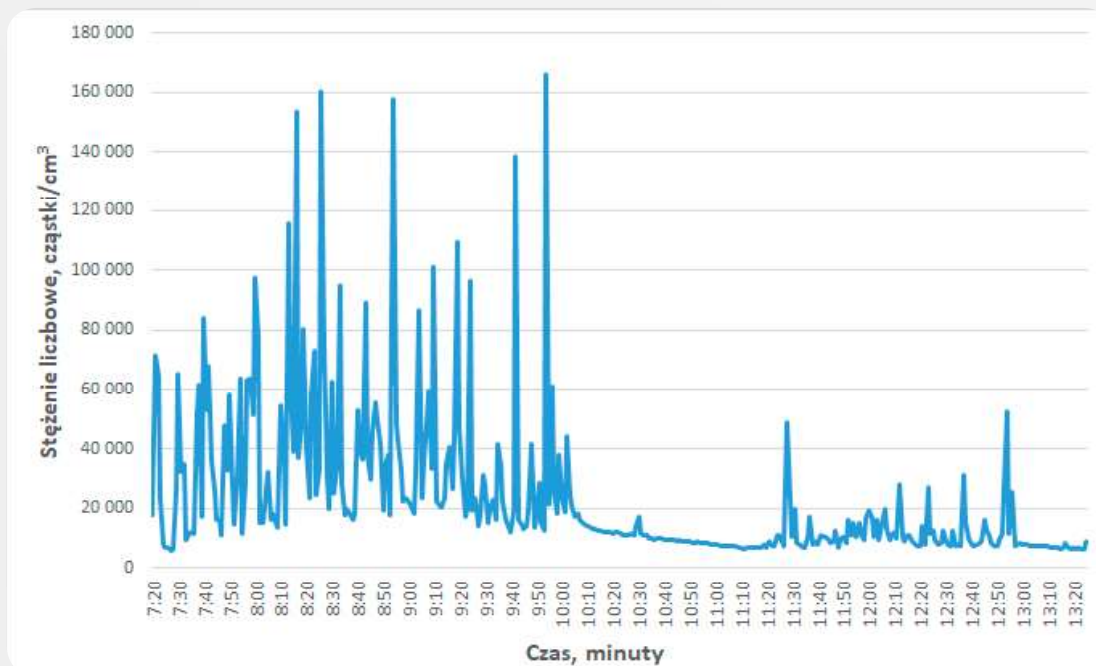
blize stanowiska operatora oraz monitorowano parametry powietrza (za pomocą termohigrometru, fot. 3.). Wykorzystywany spektrometr jest urządzeniem zliczającym optycznie cząstki w kilkudziesięciu kanałach rozmiarowych od 0,25 μm do 35 μm , zastosowany do określania stężeń liczbowych cząstek wybranych frakcji.

Warunki środowiskowe były praktycznie niezmiennie podczas pomiarów (temperatura w zakresie 23,5 ÷ 24,5 °C, ciśnienie 1006,5 ÷ 1011,6 hPa, wilgotność 19-27%). Ponieważ spektrometr jest wyposażony

w osuszacz, który niweluje wpływ wilgoci na pomiar, a temperatura i ciśnienie nieznacznie fluktuowały, więc uznano, że nie mają wpływu na otrzymane wyniki. Pomiar frakcji wdychalnej aerozolu wykazał stężenie 0,07 mg/m^3 , zaś frakcji respirabilnej aerozolu wyniósł 0,04 mg/m^3 , co było poniżej NDS w odniesieniu do tlenków żelaza (substancja ustalona ze względu na skład elementów poddawanych procesowi wycinania), dla których NDS frakcji wdychalnej wynosi 5 mg/m^3 , a frakcji respirabilnej 2,5 mg/m^3). Jednak interesujące informacje dostarczył spektrometr (rys.).

Przez prawie 3 godziny rejestrowano wysokie i krótkotrwałe wzrosty stężeń liczbowych, które korelowały z momentami wyprowadzania wyciętych produktów poza maszynę. Po tym czasie rejestrowane stężenie liczbowe obniżyło się znacząco (przerwa ok. godziny 10:05), a następnie liczba pików oraz ich intensywność zmalały. Po krótkim wywiadzie z pracownikiem, okazało się, że proces prowadzony był z wykorzystaniem metalu pokrytego cienką warstwą oleju (pozostałość po produkcji), a następnie, w połowie zmiany został wymieniony na suchy metal od innego producenta. Emisja z wycinarki była relatywnie niska, jednak każdy element pokryty olejem emitował znaczne ilości cząstek do powietrza, co było najpewniej efektem rozgrzania warstwy olejowej.

Taka informacja pozwala pracodawcy inaczej umiejscowić stanowisko pracownika, zastosować odciąg miejscowy lub też obudowę miejsca, gdzie wyprowadzane są gotowe elementy. Na tym stanowisku jest też inny skład emitowanych aerozoli i należy spodziewać się raczej mgły olejowej niż aerozoli pochodzenia metalicznego. Takich wniosków nie można by jednak wyciągnąć wyłącznie na podstawie analizy gravimetrycznej.



Rys. Stężenie liczbowe wszystkich badanych rozmiarów cząstek, rejestrowane przez 360 min w trakcie prowadzonych pomiarów za pomocą spektrometru Mini WRAS
Fig. Number concentration of all tested particle sizes, recorded for 360 minutes during measurements conducted with the Mini WRAS spectrometer

Niskokosztowe sensory optyczne

Pomimo regularnych pomiarów czynników szkodliwych w środowisku pracy, do których zobowiązują przepisy prawa pracy, często zdarza się, że pracownicy, służby bhp oraz pracodawcy nie są świadomi wszystkich występujących w zakładzie zagrożeń. Natężenia i stężenia czynników szkodliwych mogą również ulegać zmianom z powodu zużycia lub uszkodzenia maszyn, błędów ze strony pracowników itd. Im większy zakład pracy, tym jest większe tempo i dynamika tych zmian, a jednocześnie bardziej utrudniona kontrola nad nimi, co zwiększa poziom zagrożenia dla pracowników.

Skutecznym rozwiązaniem tego problemu może być mobilny monitoring parametrów środowiska pracy umożliwiający szybkie wykrycie obszarów o dużym stężeniu aerozoli oraz wytypowanie ich źródeł. Dzięki rozwojowi technologii przez ostatnie lata, ceny podzespołów oraz ich rozmiary uległy redukcji. W efekcie produkowane są już na dużą skalę niskokosztowe, niewielkie sensory optyczne, które można stosować do wytwarzania relatywnie dokładnych mierników środowiskowych, a także stacjonarnych i mobilnych sieci sensorowych [17-19]. Bardzo dobry przegląd ponad 50 różnych mierników optycznych można znaleźć w serwisie internetowym „Air Quality Sensor Performance Evaluation Center” [20].

Wskazania najtańszych sensorów są obarczone sporym błędem, ale można go zmniejszyć poprzez kalibrację względem np. metod grawimetrycznych. Poza tym, sieć monitoringu oparta na niskokosztowych sensorach nie powinna zastępować pomiarów grawimetrycznych, ale ma za zadanie zbierać długoterminowe wyniki o zmianach stężeń, wskazywać na obszary o znacznych wzrostach stężeń i ułatwiać służbom bhp reagowanie na pojawiające się wysokie poziomy zanieczyszczeń aerozolami. Dodatkowym atutem nawet najtańszych sensorów jest możliwość ich łatwej modyfikacji, przesyłania danych za pomocą WiFi lub modułów radiowych oraz integracja z innymi czujnikami środowiskowymi.

Projekt opracowania sieci mierników monitorujących czynniki szkodliwe w środowisku pracy (aerozole pyłowe i hałas) jest obecnie prowadzony w CIOP-PIB w ramach zadania 2.SP.15 pn. „Opracowanie systemu monitorowania zagrożeń pyłowych i akustycznych w czasie zbliżonym do rzeczywistego, opartego na bezprzewodowym przesyłaniu danych i przenośnych stacjach pomiarowych w środowisku pracy”.

Podsumowanie

Automatyczne mierniki stężenia substancji zawartych w powietrzu, pracujące w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego, zwłaszcza bazujące na sensorach optycznych, wydają się stanowić ważne wsparcie dla metod grawimetrycznych przy ocenie narażenia i ryzyka związanego z aerozolami w środowisku pracy. Niski koszt zakupu sensorów sprawia, że produkcja mierników optycznych jest opłacalna, co przekłada się na utworzenie własnej sieci monitorowania stężeń w zakładzie pracy. Dzięki łączności bezprzewodo-

wej sieć monitoringu może wykorzystywać mierniki stacjonarne albo mobilne (np. na pojazdach lokalizowanych za pomocą GPS w dużych halach magazynowych, portach czy też lotniskach). Należy zaznaczyć, że ze względu na niższą dokładność i brak stosownych norm, metody optyczne nie są równorzędne z metodami grawimetrycznymi, jednak warto jest uwzględnić je w monitorowaniu warunków pracy.

BIBLIOGRAFIA

[1] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. z 1997 r., Nr 129, poz. 844 z późniejszymi zmianami). <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20031691650>

[2] Serwis internetowy CIOP-PIB „Bezpieczniej”. <http://www.ciop.pl/bezpieczniej>

[3] POŚNIAK, M., SKOWROŃ, J., AUGUSTYŃSKA, D., Wstęp, s. 11-19. Praca zbiorowa pod redakcją POŚNIAK, M. Czynniki szkodliwe w środowisku pracy. Wartości dopuszczalne., Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. CIOP-PIB, Warszawa 2018. Wyd. XI zmienione.

[4] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy; tekst jednolity Dz.U. 2018 poz. 1286. <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180001286>

[5] Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy, Dz.U. 1974 nr 24 poz. 141, tekst jednolity Dz.U. 2016 poz. 1666.

[6] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2011 nr 33 poz. 166.

[7] Główny Urząd Statystyczny Warunki pracy w 2018 r., Warszawa 2019. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/rynek-pracy/warunki-pracy-wypadki-przy-pracy/warunki-pracy-w-2018-roku,1,13.html>

[8] WIĘCEK, E. Kryteria zdrowotne pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy [Health criteria for collecting aerosol samples in work environment]. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2011,2,(68): 5-21, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-d62425b9-5c0d-40da-8b21-fabd7eeb45e1/c/Wiecek.pdf>

[9] RAIZER, M. Co to jest pył zawieszony, s. 14. Praca zespołowa pod redakcją JUDY-REZLER K., TOCZKO, B. Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce.

https://www.gios.gov.pl/images/aktualnosci/Pyly_drobne_w_atmosferze.Kompendium_wiedzy.pdf

[10] POŚNIAK, M., PESTKA-PĘDZIWIATR, B. Kwas siarkowy(VI) – frakcja torakalna – metoda oznacza-

nia, [Sulfuric acid (IV) – thoracic fraction – marking methods]. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2012,1(71): 97-103. <https://www.ciop.pl/CIOPortalWAR/file/72790/2014072991818&012012Kwas.pdf>

[11] ROGULSKI, M., BĄDYDA, A. Investigation of Low-Cost and Optical Particulate Matter Sensors for Ambient Monitoring. Atmosphere 2020,11(10),1040. <https://doi.org/10.3390/atmos11101040> L. Benini, E. Farrella, C. Guiducci. Wireless sensor networks: Enabling technology for ambient intelligence. Microelectronics Journal 2006, 37(12): 1639-1649. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2006.04.021>

[12] BORREGO, C. i in. Assessment of air quality micro-sensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. Atmospheric Environment 2016, Vol. 147.

[13] BUDDÉ, M., BUSSE, M., BEIGL, M. Investigating the use of commodity dust sensors for the embedded measurement of particulate matter. Materiały konferencyjne 2012 Ninth International Conference on Networked Sensing Systems (INSS).

[14] CLEMENTS, A.L., W. G. GRISWOLD, W.G. i in. Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice (A Workshop Summary), Sensors (Basel) 2017 Nov; 17(11): 2478. <https://doi.org/10.3390/s17112478>

[15] MCKERCHER, G.R., SALMOND, J.A. VANOS, J.K. Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors, Environmental Pollution 2017,223: 102-110, DOI: 10.1016/j.envpol.2016.12.045.

[16] LEWIS, A.C., LEE, J.D. i in. Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research, Faraday Discussions, 2016, 189:85-103, doi: 10.1039/c5fd00201j.

[17] HASENFRATZ, D. i in. Deriving high-resolution urban air pollution maps using mobile sensor nodes. Pervasive and Mobile Computing 2015, vol. 16., doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.11.008

[18] CASTELL, N. i in. Mobile technologies and services for environmental monitoring: The Citi-Sense-MOB approach. Urban Climate 2015, vol. 14., doi:10.1016/j.uclim.2014.08.002

[19] JOVAŠEVIĆ-STOJANOVIĆ, M., BARTONOVA, A. i in. On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter. Environmental Pollution, 2015; 206:696-704, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>

[20] Air Quality Sensor Performance Evaluation Center, serwis 'South Coast Air Quality Management District', dost. pod adresem: <http://www.aqmd.gov/eq-spec/evaluations/summary-pm>

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.