

dr hab. EDWARD WIĘCEK
Przewodniczący Grupy Ekspertów
ds. Pyłów Przemysłowych
Międzyresortowej Komisji ds.
Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń
i Natężeń Czynników Szkodliwych
dla Zdrowia w Środowisku Pracy

Kryteria zdrowotne pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy

Słowa kluczowe: pobieranie frakcji wymiarowych aerozoli, pył całkowity, frakcja wdychalna, frakcja torakalna, frakcja respirabilna, frakcja PM₁₀.

Keywords: aerosol size-selective sampling, total dust, inhalable fraction, thoracic fraction, respirable fraction, PM₁₀ fraction.

W artykule przedstawiono niektóre problemy związane z pobieraniem próbek aerozoli w celu oceny ryzyka zdrowotnego w środowisku pracy i zgodności przyjętych wielkości z wartościami najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS).

Dla pyłów powodujących krzemicę i inne pylice płuc największe znaczenie ma frakcja deponowana w obszarze wymiany gazowej płuc. Dokonano przeglądu standardów i kryteriów dla pyłu respirabilnego przyjętych przez: BMRC (British Medical Research Council), Międzynarodową Konferencję w Johannesburgu), AEC (Atomic Energy Commission) i ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists).

Dla cząstek deponowanych w obrębie głowy i w obszarze tchawiczo-oskrzelowym przedyskutowano definicje frakcji wymiarowych Komitetu Technicznego 146- ISO, Grupy ACGIH-ASP (Air Sampling Procedures) i U.S. EPA (Environmental Protection Agency).

W celu ustalania wartości NDS dla aerozoli w Polsce zalecono zmodyfikowane przez Soderholma kryteria ich pobierania dla następujących frakcji wymiarowych: wdychalnej, torakalnej i respirabilnej.

UWAGI WSTĘPNE

Pobieranie próbek aerozoli może być podejmowane w celu uzyskania bardzo różnorodnych informacji. W niniejszym artykule zostanie omówiony wyłącznie problem pobierania próbek aerozoli związany z oceną narażenia na działanie aerozoli wnikających do organizmu człowieka w procesie oddychania oraz problem zgodności uzyskanych informacji z wartościami normatywów higienicznych środowiska pracy.

Skutki zdrowotne związane z wdychaniem cząstek aerozoli są związane z ich właściwościami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi. Właściwości te determinują los cząstek w układzie

oddechowym i ich interakcję z komórkami i tkankami w miejscu ich depozycji w drogach oddechowych.

W układzie oddechowym można wyróżnić kilka obszarów czynnościowych różniących się istotnie budową, rozmiarem oraz mechanizmami depozycji i eliminacji cząstek. W związku z tym, określenie dawki wdychanego czynnika szkodliwego, od której zależy skutek zdrowotny, powinno się wiązać z określeniem depozycji cząstek w poszczególnych obszarach czynnościowych, określeniem czasu ich przebywania w miejscach depozycji (czasu retencji) i mechanizmów ich eliminacji z układu oddechowego. Szczegółowe dane dotyczące anatomii układu oddechowego i czynników wpływających na depozycję, retencję i eliminację cząstek aerozoli są zawarte w opracowaniach *Hatch i Gross (1964)*, *Brain i Valberg (1979)* oraz *Lippmann i in. (1980)*.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, Amerykańskie Stowarzyszenie Higienistów Przemysłowych) do celów oceny narażenia na cząstki aerozoli podzieliło układ oddechowy na trzy obszary czynnościowe:

- dróg oddechowych w obrębie głowy (HAR) – jama ustna, jama nosowa, gardło i krtań
- tchawiczo-oskrzelowy (TBR) – tchawica, oskrzela, oskrzeliki i oskrzeliki końcowe
- wymiany gazowej (GER) – oskrzeliki oddechowe, przewody pęcherzykowe i pęcherzyki płucne.

Obszar tchawiczo-oskrzelowy i obszar wymiany gazowej są zlokalizowane w obrębie klatki piersiowej. Depozycja aerozoli w każdym z obszarów dróg oddechowych zależy od rozmiaru aerodynamicznego lub termodynamicznego cząstek, rozmiaru dróg oddechowych i od charakterystyki oddychania (prędkości przepływu powietrza, częstości oddychania i sposobu oddychania).

W idealnym przypadku pobieranie próbek aerozoli do celów oceny narażenia na stanowiskach pracy i ich dalsza analiza powinny dostarczyć informacji dotyczących oczekiwanej depozycji aerozoli w każdym z wyżej wymienionych obszarów czynnościowych. Informacje te mogą być wyrażane jako stężenia: liczbowe, powierzchniowe lub masowe aerozoli w środowisku pracy. Pobrane próbki mogą być także analizowane w celu określenia stężenia liczbowego włókien azbestowych lub po inkubacji do określenia stężenia liczbowego mikroorganizmów.

PYŁ CAŁKOWITY I PYŁ RESPIRABILNY

Pierwszym pojęciem związanym ze stężeniem aerozoli w powietrzu było pojęcie „pył całkowity”, którym obejmowano wszystkie cząstki zawieszone w powietrzu. Pojęcie to było równoznaczne z pojęciem „pył zawieszony”. Sądono, że stężenie pyłu całkowitego można mierzyć w prosty sposób, zasysając powietrze przez kolektor cząstek nieposiadający żadnych ograniczeń dotyczących kształtu czy rozmiarów otworu wlotowego do kolektora ani ograniczeń dotyczących prędkości i objętości zasysanego powietrza.

Cząstki aerozoli przenikające przez część układu oddechowego pokrytą nabłonkiem migawkowym wnikają do obszaru wymiany gazowej, jednak nie wszystkie są tu retencjonowane. Niektóre z nich są wydychane, a niektóre po depozycji są po krótkim czasie przebywania eliminowane z tej części układu oddechowego. Mogłoby się więc wydawać, że najlepszą i najbardziej bezpośrednią drogą do ustalenia ilości pyłu retencjonowanego przez długi okres byłoby porównanie masowego rozkładu cząstek pyłu wdychanego z rozkładem masowym pyłu, który został nagromadzony w płucach. Niestety, tego rodzaju badania są trudne do przeprowadzenia w eksperymencie na zwierzętach i prawnie niedozwolone w eksperymencie na ludziach.

Cartwright i Skidmore (1964) narażali szczury, między innymi, na szklane mikrocząstki kuliste. Stwierdzili, że pył z płuc narażanych zwierząt z dużym nagromadzeniem cząstek ma taki sam

rozkład wymiarowy jak pył z płuc zwierząt z niewielkim nagromadzeniem pyłu. Także porównanie pyłu odzyskanego od zwierząt uśmierconych po 6 miesiącach od narażenia z pyłem odzyskanym z płuc zwierząt uśmierconych po 5 dniach od narażenia pozwoliło stwierdzić, że połowa pyłu nagromadzonego po 5 dniach została wyeliminowana 6 miesięcy później, jednak rozkład wymiarowy cząstek nie uległ w tym czasie zmianie. Stwierdzono także, że próbki aerozoli pobierane zgodnie z kryterium dla pyłu respirabilnego, opracowanym w 1952 r. przez British Medical Research Council (BMRC), mają charakterystykę wymiarową zbliżoną (w rozsądnych granicach) do pyłów nagromadzonych w płucach szczurów. Kryterium BMRC zostanie szczegółowo omówione w dalszej części artykułu.

W przeszłości pobieranie próbek aerozoli w środowisku pracy najczęściej prowadzono z wykorzystaniem urządzeń jednostopniowych, a pobrane próbki analizowano w celu oznaczenia stężenia masowego wszystkich cząstek (pyłu całkowitego) lub stężenia masowego wybranych składników aerozolu. Należy przy tym pamiętać, że pobierane aerozole mogą zawierać bardzo duże cząstki, które determinują wielkość stężenia masowego i mają zazwyczaj tylko znikome znaczenie biologiczne.

Następną czynnością było więc zdefiniowanie biologicznie ważnej frakcji pyłu, która została nazwana frakcją inspirabilną (wdychalną), przyjmując, że jest to frakcja pyłu całkowitego, która w procesie oddychania wnika do układu oddechowego przez nos i usta. Zasada ta została w 1983 r. zaadaptowana przez Międzynarodową Organizację Standardów (ISO) i w 1985 r. przez ACGIH, które uzgodniły ponadto, że dopuszczalne poziomy narażenia, np. wielkości TLV, będą ustalane na podstawie frakcji inspirabilnej. Oddzielna alternatywna propozycja ISO dotyczyła pyłu całkowitego zdefiniowanego tym razem jako pył zbierany w kolektorze (np. na filtrze), do którego powietrze jest zasysane z prędkością liniową od 1,1 do 3,0 m/s i z przepływem powietrza między 0,5 i 4,0 l/min. W praktyce stosuje się wiele różnych urządzeń do pobierania próbek aerozoli zarówno stacjonarnych, jak i indywidualnych, odbiegających zarówno od kryterium ISO dla pyłu całkowitego, jak i od kryterium dla frakcji inspirabilnej, dlatego wyniki pomiarów wykonane różnymi przyrządami nie zawsze mogą być ze sobą porównywane.

POMIARY STĘŻEŃ MASOWYCH W ZAKRESIE RÓŻNYCH FRAKCJI WYMIAROWYCH AEROZOLI

Dawka wdychanego czynnika szkodliwego dla zdrowia zależy od obszaru czynnościowego w układzie oddechowym, w którym został on zdeponowany, a wielkość depozycji zależy z kolei od rozmiaru cząstek aerozolu, dlatego najlepszym oszacowaniem wielkości dawki czynnika szkodliwego, którego działanie biologiczne jest proporcjonalne do wchłoniętej masy, byłyby pomiary stężeń masowych w różnych zakresach wymiarowych cząstek.

Pomiary stężeń masowych w wybranych zakresach wymiarowych cząstek aerozoli można wykonać różnymi metodami przez:

- rozdzielenie aerozolu w trakcie pobierania prób na frakcje wymiarowe odpowiadające zakładanej depozycji w różnych obszarach czynnościowych układu oddechowego
- analizę wymiarową aerozolu za pomocą konifugi, impaktora kaskadowego lub spektrometru optycznego do pomiaru światła widzialnego lub laserowego rozproszonego na cząstkach aerozolu
- analizę wymiarową pobranych próbek aerozolu.

Największe znaczenie w pomiarach stężeń masowych mają pomiary z wykorzystaniem metod, w których aerozol jest frakcjonowany na podstawie średnicy aerodynamicznej cząstek w taki

sam sposób, w jaki dokonuje się frakcjonowanie cząstek w układzie oddechowym, ponieważ w tym przypadku różnice w kształcie i gęstości cząstek są kompensowane automatycznie.

Pomiary optyczne oparte na analizie światła rozproszonego mogą dostarczyć informacji dotyczących rozmiarów cząstek, ale konwersja danych w celu uzyskania informacji o masowych stężeniach poszczególnych frakcji musi zakładać uśrednioną gęstość różnych cząstek. W analizowanym przypadku dokładność pomiaru rozkładu wymiarowego zależy ponadto od: kształtu cząstek, współczynnika odbicia światła oraz rodzaju powierzchni cząstek.

Pomiary rozkładów wymiarowych cząstek aerozoli są także obarczone błędami, ponieważ w tym przypadku nie ma możliwości przeprowadzenia badania w oryginalnym stanie rozproszenia, gdyż cząstki mogą występować jako cząstki pojedyncze, a w pobranej próbce mogą tworzyć agregaty lub odwrotnie – mogą występować jako cząstki pojedyncze.

STANDARDY I KRYTERIA PYŁU RESPIRABILNEGO

Najwcześniej, bo już pod koniec lat 40. ubiegłego stulecia, stwierdzono, że dla pyłów pylicotwórczych największe znaczenie ma ta frakcja aerozolu, która ulega retencji na dłuższy okres w pęcherzykach płucnych.

W 1952 r. w British Medical Research Council (BMRC) przyjęto definicję pyłu respirabilnego jako pyłu docierającego w procesie oddychania do obszaru pęcherzykowego płuc. Definicja ta odnosi się do pyłów pylicotwórczych. W BMRC zalecono także, by do pomiaru tej frakcji stosować elutriator poziomy (typ Hexlet), o następującej charakterystyce przepuszczalności cząstek w zależności od ich rozmiarów:

- 0% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej $7,1 \mu\text{m}$
- 50% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej $5 \mu\text{m}$
- 100% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej $< 1 \mu\text{m}$.

Taką samą definicję pyłu respirabilnego przyjęto na Światowej Konferencji poświęconej pylicom płuc, która odbyła się w 1959 r. w Johannesburgu. Na konferencji tej w celu praktycznej realizacji przyjętych założeń ustalono, że próbki pyłu respirabilnego powinny być pobierane wyłącznie z chmury pyłu znajdującej się w oryginalnym stanie rozproszenia, a pył respirabilny określono w zależności od prędkości opadania cząstek na podstawie następującego wzoru:

$$C/C_0 = 1 - (f/f_c),$$

gdzie:

C i C_0 – stężenia cząstek o prędkości opadania f w pyłe respirabilnym i w pyłe całkowitym,
 f_c – wielkość stała, równa dwukrotnej prędkości opadania kuli o gęstości jednostkowej (1 g/cm^3) i średnicy $5 \mu\text{m}$.

Na przełomie 50. i 60. lat w higienie pracy dokonał się znaczący przełom myślowy polegający, między innymi, na uznaniu, że:

- stężenia masowe stanowią lepsze kryterium oceny narażenia od stężeń liczbowych
- średnia ważona dla 8-godzinnego dnia pracy stanowi wartość, która w procesie oceny narażenia powinna być porównywana z dopuszczalnym stężeniem czynnika szkodliwego dla zdrowia
- pomiary indywidualne stanowią podstawową strategię oceny narażenia.

Przyjęcie tych założeń spowodowało pojawienie się w tym czasie drugiego standardu dla frakcji respirabilnej, który został ustalony w 1961 r. na spotkaniu sponsorowanym przez U.S.

Atomic Energy Commission (AEC). Pył respirabilny został zdefiniowany, podobnie jak na konferencji w Johannesburgu, jako część pyłu wdychalnego (inspirabilnego), która przenika do niepokrytej nabłonkiem migawkowym części płuc. Definicja dotyczyła wyłącznie cząstek nierozpuszczalnych i nietoksycznych charakteryzujących się przedłużoną retencją w płucach. Ponieważ elutriatory poziome, zalecane przez BMRC i przyjęte na konferencji w Johannesburgu, mogły być wykorzystywane wyłącznie przy wykonywaniu pomiarów stacjonarnych, więc w celu wykonania pomiarów indywidualnych zaistniała konieczność zmiany typu selektora wstępnego. Według AEC wymagania te spełniał selektor wstępny – mikrocyklon o następującej charakterystyce przepuszczalności cząstek:

- 0% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 10 μm
- 25% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 5 μm
- 50% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 3,5 μm
- 75% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 2,5 μm
- 100% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 2 μm .

W ACGIH w 1968 r. rozpoczęto proces ustalania wartości TLV (*threshold limit value*) dla pyłów respirabilnych: kwarcu, krystobalitu i trydymitu, na podstawie nieznacznie zmodyfikowanego kryterium respirabilności AEC. Podobnie jak w zaleceniach AEC wybrano taki sam selektor wstępny (mikrocyklon) o nieznacznie zmienionej charakterystyce przepuszczalności cząstek:

- 0% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 10 μm
- 25% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 5 μm
- 50% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 3,5 μm
- 75% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 2,5 μm
- 90% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 2,0 μm .

W okresie od 1952 do 1980 r. przyjmowano za akceptowalne wszystkie trzy kryteria dla pyłu respirabilnego, gdyż wykorzystywały one podobne, choć nie identyczne, krzywe charakteryzujące przepuszczalność zalecanych selektorów wstępnych. W praktyce okazało się ponadto, że wyniki pomiarów stężeń frakcji respirabilnej dla różnych pyłów mineralnych wykonano przyrządami spełniającymi kryteria, które różniły się między sobą nie więcej niż o 10%.

Analizując omówione kryteria pyłu respirabilnego, można jednak stwierdzić, że cechuje je znaczny stopień arbitralności. Kryteria BMRC, AEC oraz ACGIH bazują na aerozolu, który w procesie oddychania wnika do pęcherzykowego obszaru płuc. Kryteria te nie biorą jednak pod uwagę depozycji cząstek w tej części płuc, od której zależy intensywność i rozległość procesu zwłóknienia tkanki płucnej. Należy zdać sobie sprawę z tego, że nie wszystkie cząstki, które wniknęły do pęcherzyków płucnych, ulegają depozycji. Część z nich ze względu na niewielkie rozmiary pozostaje przez pewien czas w stanie zawieszonym i ulega wydaleniu wraz z powietrzem wydechowym.

HARMONIZACJA I UNIFIKACJA STANDARDÓW I KRYTERIÓW FRAKCJI WYMIAROWYCH AEROZOLI PO 1980 R.

Przyjęte w okresie 1952-1980 r. kryteria dla pyłu respirabilnego rozwiązały do pewnego stopnia problem oceny narażenia na działanie pyłów pylicotwórczych oraz problemy nadzoru nad warunkami pracy w takich gałęziach przemysłu, jak: górnictwo węgla i surowców mineralnych, przemysł ceramiczny i inne, gdzie głównym problemem było narażenie na krystaliczne formy ditlenku krzemu.

Nierozwiązane pozostawały jednak problemy dotyczące oceny narażenia na cząstki deponowane w drogach oddechowych zlokalizowane w obrębie głowy i w obszarze tchawiczo-oskrzelowym,

które wywoływały takie choroby, jak: astma, rak nosa i zatok przynosowych, rak oskrzeli oraz przewlekłe nieżyty oskrzeli. Próby rozwiązania tych problemów zostały podjęte przez U.S. Environmental Protection Agency (EPA) i ISO, do których dołączyła także ACGIH.

EPA dążąc do stworzenia standardów jakości powietrza atmosferycznego w celu ochrony zdrowia ogółu ludności w USA, uznała, że choroby, które mogą mieć związek z wdychaniem aerozoli zawieszonych w powietrzu atmosferycznym dotyczą cząstek, które przeniknęły przez górne drogi oddechowe (obszar w obrębie głowy) i są deponowane w obszarze tchawiczo-oskrzelowym i/lub w obszarze pęcherzykowym. Początkowo tę frakcję nazwano frakcją wdychalną (*inhalable fraction*). Użycie terminu *inhalable fraction* do oznaczenia cząstek przenikających przez górne drogi oddechowe i wnikaających do obszarów zlokalizowanych w klatce piersiowej było jednak niezgodne z terminologią stosowaną w Europie, gdzie termin *inhalable* lub *inspirable fraction* stosowano na określenie cząstek aerozolu wnikaających do dróg oddechowych przez nos i usta. Ostatecznie EPA zdecydowała się w 1987 r. w swoim podstawowym standardzie jakości powietrza zastąpić termin *inhalable fraction* na PM_{10} (*particulate matter below a 10 μm cut size*). Charakterystyka przepuszczalności cząstek o różnych rozmiarach dla przyrządu do pobierania frakcji PM_{10} zalecana przez EPA jest następująca:

- 0% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 18 μm
- 50% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 10 μm
- 98% przepuszczalności dla cząstek o średnicy aerodynamicznej 2 μm .

Zdaniem EPA, przyrząd do pobierania prób aerozoli atmosferycznych o takiej charakterystyce najlepiej nadaje się do pomiaru frakcji wnikającej do dróg oddechowych zlokalizowanych w klatce piersiowej. W tym samym czasie EPA rezygnuje z wcześniej stosowanego terminu TSP (*total suspended particles*).

W 1983 r. Komitet Techniczny 146 – „Jakość powietrza” ISO powołał ad hoc grupę roboczą z zadaniem przygotowania zaleceń odpowiednich definicji niezbędnych przy opracowywaniu standardowych metod pobierania i analizy zanieczyszczeń powietrza w środowisku pracy i środowisku ogólnym. W celu zdefiniowania frakcji aerozolu deponowanych w różnych obszarach układu oddechowego grupa robocza wykorzystwała dane dotyczące rozkładów wymiarowych cząstek aerozoli zdeponowanych w płucach zwierząt doświadczalnych i pyłe pobrane za pomocą przyrządów umożliwiających podział pobieranej próby na frakcje wymiarowe. W celu uniknięcia konfliktu z definicją frakcji wdychalnej (*inhalable fraction*), zaproponowaną wcześniej przez EPA, frakcję wnikającą przez nos lub usta nazwano frakcją inspirabilną (*inspirable fraction*), a deponowaną w obrębie głowy – frakcją ekstratorakalną (*extrathoracic fraction*). Frakcja przenikająca przez krtani została nazwana frakcją torakalną (*thoracic fraction*), która następnie została jeszcze podzielona na frakcję tchawiczo-oskrzelową (*tracheobronchial fraction*) i frakcję pęcherzykową (*alveolar fraction*). W ISO przyjęto dla frakcji torakalnej $D_{50} = 10 \mu m$, a w zakresie „respirabilnym” zalecenia ISO pozostawiają do wyboru kryterium BMRC i/lub ACGIH. Parametr $D_{50} = 10 \mu m$ przyjęty przez ISO dla frakcji torakalnej jest w zasadzie zgodny ze standardem EPA dla PM_{10} .

W zaleceniach ISO zwrócono uwagę na potrzebę weryfikacji niektórych dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego (*occupational exposure level*), podkreślając, że szkodliwe działanie cząstek nie ogranicza się wyłącznie do miejsca ich depozycji w układzie oddechowym. Dotyczy to zwłaszcza czynników szkodliwych, które w środowisku występują w postaci ciekłej lub w stanie ciekłym stanowią składnik cząstek stałych. Depozycja takich aerozoli prowadzi, w każdej części układu oddechowego, do ich absorpcji przez otaczające tkanki. Cząstki deponowane w obrębie głowy, jeżeli nie zostaną usunięte przez usta i nos, mogą zostać połknięte i zaabsorbowane, stwarzając zagrożenie w układzie pokarmowym. Natomiast cząstki deponowane w obszarze tchawiczo-oskrzelowym i eliminowane z tego obszaru przez mechanizm migawkowy są także połyka-

ne, a cząstki deponowane w pęcherzykach płucnych mogą przenikać do układu limfatycznego, w tym do węzłów chłonnych.

W 1982 r. ACGIH powołuje ad hoc Committee on Air Sampling Procedures (ASP) w celu przygotowania zaleceń pobierania próbek frakcji wymiarowych aerozoli zgodnych z kryteriami ustalania wartości TLV dla tych frakcji. Raport końcowy ASP został opublikowany w 1984 r.

Najważniejsze wnioski zawarte w raporcie ASP są następujące:

- depozycja aerozoli w drogach oddechowych w obrębie głowy (HAR) jest związana ze zwiększonym ryzykiem rozwoju raka nosa u pracowników przemysłu drzewnego i skórzanego oraz rakowaceniem przegrody nosowej u pracowników rafinerii chromu
- cząstki aerozoli zdeponowane w obszarze tchawiczo-oskrzelowym (TBR) mogą się przyczyniać do rozwoju nieżytów oskrzeli i raka oskrzeli
- cząstki aerozoli zdeponowane w obszarze wymiany gazowej (GER) mogą powodować rozedmę płuc i pylice płuc
- zagrożenia związane z wdychaniem cząstek mających działanie toksyczne poza drogami oddechowymi po ich rozpuszczeniu w krążących płynach ustrojowych zależą raczej od depozycji w całym układzie oddechowym niż od depozycji w poszczególnych obszarach czynnościowych.

Komitet ASP rozważył następnie kilka wariantów pobierania prób frakcji wymiarowych aerozoli reprezentatywnych dla specyficznych zagrożeń zdrowotnych. Rozważano, między innymi, pobieranie prób imitujące depozycję cząstek w poszczególnych obszarach czynnościowych dróg oddechowych oraz pobieranie próbek prowadzące do zebrania cząstek, które mogą wnikać do poszczególnych obszarów czynnościowych, ale niekoniecznie muszą być w nich zdeponowane. Komitet ASP opowiedział się za drugim wariantem, ponieważ w wariancie tym stosuje się prostszą i tańszą aparaturę i jest on praktyczniejszy, co znalazło potwierdzenie w dotychczasowych pomiarach frakcji respirabilnej. Wiadomo, że wyniki pomiarów stężenia frakcji respirabilnej mogą być nawet 5 ÷ 10 razy większe od frakcji deponowanej w płucach, ponieważ 80 ÷ 90% cząstek w zakresie wymiarowym 0,1 ÷ 1,0 µm może być wydychane. Ponieważ frakcja deponowana w obszarze wymiany gazowej GER jest wielkością stałą w stosunku do całego pyłu respirabilnego, można przyjąć stężenie frakcji respirabilnej za adekwatny wskaźnik zagrożenia zdrowia. Urządzenie, które by imitowało depozycję cząstek w GER, byłoby trudne do zaprojektowania i stosowania, jak również nie pozwoliłoby na uzyskanie lepszego wskaźnika zagrożenia zdrowia.

Aerozol HAR, który wnika do obszaru w obrębie głowy, został nazwany frakcją inspirabilną (IPM, *inspirable particulate mass fraction*). Aerozol TBR, który przenika przez obszar HAR i wnika do obszaru tchawiczo-oskrzelowego, został nazwany frakcją torakalną (TPM, *thoracic particulate mass fraction*). Dla TPM komitet ASP zdecydował się wykorzystać dane dotyczące depozycji w HAR podczas oddychania przez usta, czyli algebraiczna różnica między frakcjami IPM i TPM w przybliżeniu odpowiada depozycji w HAR podczas oddychania przez usta. Ponieważ oddychanie przez nos powoduje zawsze większą depozycję w HAR niż oddychanie przez usta, w związku z czym rzeczywista depozycja w HAR będzie większa od depozycji obliczonej z różnicy IPM i TPM. W konsekwencji frakcja TPM przecenia zagrożenia dla TBR podczas oddychania przez nos. Podobnie algebraiczna różnica między frakcjami TPM i RPM (*respirable particulate mass fraction*) odpowiada w przybliżeniu depozycji w TBR podczas oddychania przez usta, natomiast w przypadku oddychania przez nos różnica między TPM i RPM jest mało precyzyjnym odzwierciedleniem depozycji w TBR.

Zalecenia ASP dotyczące pobierania próbek różnych frakcji są następujące:

- aerozole, które stanowią zagrożenie po zdeponowaniu w obrębie głowy (HAR), a także gdy toksyczność układowa może być następstwem depozycji w którymkolwiek obszarze

czynnościowym układu oddechowego, powinny być pobierane zgodnie z kryteriami dla frakcji inspirabilnej (IPM)

- aerozole, które stanowią zagrożenie po depozycji w obszarze tchawiczo-oskrzelowym (TBR) i obszarze wymiany gazowej (GER), powinny być pobierane zgodnie z kryteriami dla frakcji torakalnej (TPM)
- takie aerozole, jak krystaliczny ditlenek krzemu, stanowiące zagrożenie po depozycji w obszarze wymiany gazowej (GER), powinny być pobierane zgodnie z kryteriami dla frakcji respirabilnej (RPM).

Zalecenia ASP i ISO są podobne, lecz nie identyczne. Największe różnice dotyczą kryteriów dla IPM i RPM. Różnice powstały na skutek tego, że obie grupy korzystały z różnych danych dotyczących depozycji aerozoli w różnych obszarach czynnościowych płuc, a grupa robocza ISO nie miała wcale dostępu do danych dotyczących depozycji cząstek większych od 40 µm w obszarze głowy (HAR).

Grupa ISO zrobiła racjonalne, choć nie adekwatne założenie, że można ekstrapolować dane dotyczące depozycji cząstek mniejszych od 40 µm na cząstki większe od 40 µm. W ten sposób grupa ISO otrzymała zerową depozycję dla cząstek o rozmiarze 185 µm, co nie pokrywało się z danymi, jakimi dysponowała grupa ASP. Dla RPM grupa ISO opierała się na kryterium BMRC bez uwzględnienia kryteriów alternatywnych. Kryteria ASP dla TPM są identyczne z kryteriami ISO i EPA. Zalecenia ASP zostały przyjęte przez ACGIH w 1986 r. i zostały opublikowane w publikacji „TLVs and BEIs threshold limit values for airborne contaminants” na okres 1986-1987 r. w postaci załącznika D „Particle size-selective sampling for airborne particulate matter-under study”. Zalecenia te w roku następnym zostały przyjęte ostatecznie przez ACGIH.

DEFINICJE ACGIH FRAKCJI WYMIAROWYCH AEROZOLI I ZALECENIA ICH STOSOWANIA

Dla substancji chemicznych występujących w powietrzu oddechowym w postaci zawiesiny cząstek stałych lub cząstek ciekłych (kropel) potencjalne zagrożenie zdrowia zależy od rozmiaru cząstek i od stężenia masowego w powietrzu, gdyż:

- rozmiar cząstek ma wpływ na miejsce ich depozycji w układzie oddechowym
- wiele chorób zawodowych wykazuje tendencję do związku z materiałem zdeponowanym w poszczególnych obszarach czynnościowych układu oddechowego.

W ACGIH od wielu lat zalecano pobieranie wybranej frakcji wymiarowej dla krystalicznego ditlenku krzemu, biorąc pod uwagę dobrze udokumentowaną zależność między krzemicą płuc a stężeniem frakcji respirabilnej.

Chemical Substances TLV Committee dokonuje w tym okresie weryfikacji innych substancji chemicznych występujących w środowisku pracy w postaci aerozoli, w celu zdefiniowania: 1) tej frakcji wymiarowej dla każdej substancji, która jest najbardziej związana z konkretnym skutkiem zdrowotnym oraz 2) wyboru stężenia masowego frakcji wymiarowej, dla której powinna być ustalona wartość TLV. Ostatecznie zdecydowano, że wartości TLV będą ustalane dla następujących trzech frakcji wymiarowych:

- inspirabilnej (*inspirable particulate mass* – TLV, IPM-TLV) – dla substancji, które stwarzają zagrożenie dla zdrowia po depozycji w dowolnym miejscu układu oddechowego

- torakalnej (*thoracic particulate mass* – TLV, TPM-TLV) – dla substancji, które stwarzają zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w dowolnym miejscu obszaru tchawiczo-oskrzelowego i obszaru wymiany gazowej
- respirabilnej (*respirable particulate mass fraction* – TLV, RPM-TLV) – dla substancji, które stwarzają zagrożenie dla zdrowia po zdeponowaniu w obszarze wymiany gazowej.

Wymienione trzy frakcje wymiarowe zostały zdefiniowane ilościowo w następujący sposób:

1. Frakcja inspirabilna składa się z tych cząstek, które są wychwytywane, niezależnie od orientacji urządzenia pobierającego w stosunku do kierunku wiatru, zgodnie z następującą sprawnością zatrzymywania cząstek obliczaną na podstawie wzoru:

$$E = 50(1 + \exp[-0,06 d_a]) \pm 10,$$

dla $0 < d_a < E < 100 \mu\text{m}$,

gdzie:

E – sprawność zatrzymywania cząstek, w %.

d_a – średnica aerodynamiczna cząstek, w μm .

Sprawność zatrzymywania dla cząstek o $d_a > 100 \mu\text{m}$ nie jest precyzyjnie znana.

2. Frakcja torakalna składa się z cząstek przenikających przez selektor, którego wymiarowa charakterystyka sprawności zatrzymywania cząstek jest opisana skumulowaną funkcją rozkładu logarytmiczno normalnego z medialną średnicą aerodynamiczną równą $10 \mu\text{m} \pm 1,0 \mu\text{m}$ i z geometrycznym odchyleniem standardowym równym $1,5 (\pm 0,1)$.

3. Frakcja respirabilna składa się z cząstek przenikających przez selektor, którego wymiarowa charakterystyka sprawności zatrzymywania cząstek jest opisana skumulowaną funkcją rozkładu logarytmiczno normalnego z medialną średnicą aerodynamiczną równą $3,5 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ i z geometrycznym odchyleniem standardowym równym $1,5 (\pm 0,1)$.

W 1989 r. *Soderholm*, przewodniczący grupy ASP popierany przez wszystkich członków tej grupy, zaproponował ACGIH, ISO i CEN zmodyfikowanie kryteriów frakcji wymiarowych aerozoli w celu harmonizacji i ujednoczenia tych kryteriów w skali międzynarodowej. Zmodyfikowane kryteria *Soderholma* zlikwidowały dotychczas istniejące różnice między kryteriami ACGIH i ISO oraz zostały oparte na istniejących danych doświadczalnych dotyczących depozycji cząstek aerozoli w układzie oddechowym jako całości i w jego poszczególnych obszarach czynnościowych. Inicjatywa *Soderholma* spotkała się z dużym zainteresowaniem i ostatecznie została przyjęta do stosowania przez wszystkie zainteresowane strony. *Soderholm* w swojej propozycji zmienił ponadto nazwę frakcji inspirabilnej (wdychalnej) na frakcję wdychalną (*ihalable fraction*). W 1993 r. ACGIH przyjęła zmodyfikowane propozycje i opublikowała je w załączniku D „Particle size-selective criteria for airborne particulate matter” do publikacji “TLVs and BEIs threshold limit values” w 1998 r. Uzgodnione poprawki ISO i CEN wprowadziły w 1998 r. do norm międzynarodowych i europejskich (PN-EN 481:1998).

DEFINICJE ILOŚCIOWE FRAKCJI WYMIAROWYCH AEROZOLI ZMODYFIKOWANE PRZEZ SODERHOLMA

Frakcja wdychalna (IPM) składa się z cząstek, które są wychwytywane, niezależnie od orientacji urządzenia pobierającego w stosunku do kierunku wiatru, zgodnie z następującą sprawnością zatrzymywania cząstek obliczoną na podstawie wzoru:

$$\text{IPM}(d_{ae}) = 0,5 [1 + \exp(0,06 d_{ae})],$$

dla $0 < d_{ae} < 100 \mu\text{m}$,

gdzie:

$\text{IPM}(d_{ae})$ – sprawność zatrzymywania cząstek,

d_{ae} – średnica aerodynamiczna cząstek, w μm .

Fracja torakalna (TPM) składa się z cząstek, które są wychwytywane, zgodnie z następującą sprawnością zatrzymywania cząstek:

$$\text{TPM}(d_{ae}) = \text{IPM}(d_{ae})[1 - F(x)],$$

gdzie:

$F(x)$ – skumulowana funkcja prawdopodobieństwa standaryzowanej zmiennej normalnej, x

$$x = \ln(d_{ae}/\Gamma) / \ln(\Sigma),$$

gdzie:

\ln – logarytm naturalny

Γ – 11,64 μm

Σ – 1,5.

Fracja respirabilna (RPM) składa się z cząstek, które są wychwytywane zgodnie z następującą sprawnością zatrzymywania cząstek:

$$\text{RPM}(d_{ae}) = \text{IPM}(d_{ae})[1 - F(x)],$$

gdzie:

$F(x)$ – jak wyżej, ale z:

Γ – 4,25 μm

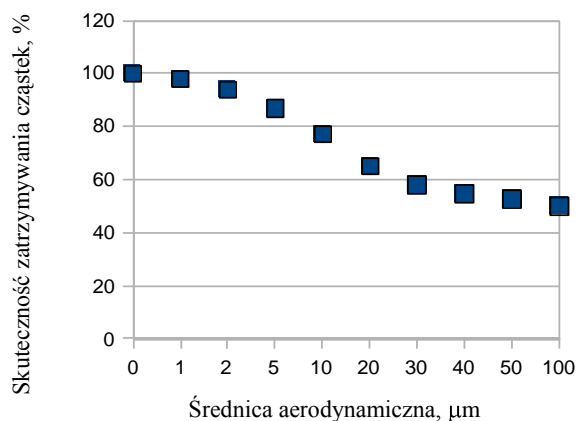
Σ – 1,5.

Najbardziej znaczącą różnicą między nowymi propozycjami i definicjami poprzednimi jest wartość medialnej średnicy aerodynamicznej dla frakcji respirabilnej, która została zwiększona z 3,5 μm do 4,0 μm , ale jest to zgodne z zaleceniami ISO/CEN, choć sprzeczne z zaleceniami OSHA, która wciąż nie zaakceptowała zaleceń ACGIH. Do pomiaru frakcji respirabilnej nie zaleca się zmiany dotychczas stosowanego selektora wstępnego (10 mm cyklon nylonowy) z przepływem powietrza 1,7 l/min, ponieważ analiza dostępnych danych pozwala stwierdzić, że wyniki pomiarów mogą być zbliżone do wyników, jakie byłyby uzyskane za pomocą idealnego selektora zdefiniowanego wcześniej, choć wydaje się, że przekonanie to jest bardziej oparte na przypuszczeniach niż na faktach.

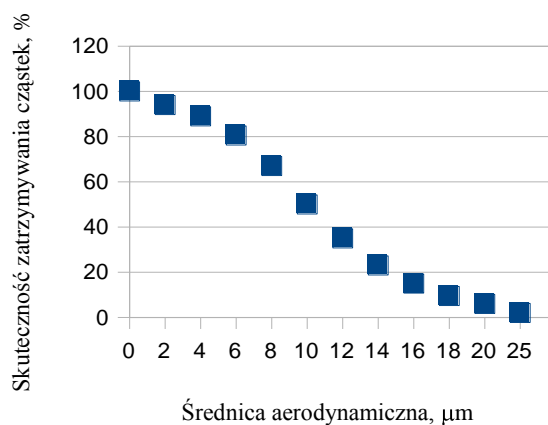
W tabelach 1., 2. i 3. oraz na rysunkach 1., 2. i 3. dla każdej ze zdefiniowanych frakcji zestawiono skuteczność zatrzymywania cząstek aerozoli o różnych rozmiarach przez idealny selektor.

Tabela 1.**Fracja wdychalna**

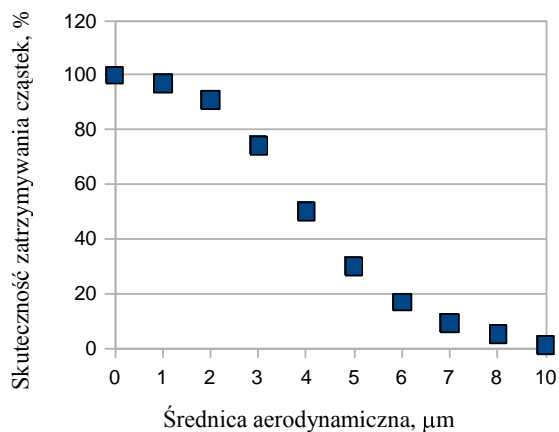
| Średnica aerodynamiczna cząstki, μm | Masa frakcji wdychanej, % |
|--|---------------------------|
| 0 | 100 |
| 1 | 97 |
| 2 | 94 |
| 5 | 87 |
| 10 | 77 |
| 20 | 65 |
| 30 | 58 |
| 40 | 54,5 |
| 50 | 52,5 |
| 100 | 50 |

**Rys. 1.** Fracja wdychalna**Tabela 2.****Fracja torakalna**

| Średnica aerodynamiczna cząstki, μm | Masa frakcji torakalnej, % |
|--|----------------------------|
| 0 | 100 |
| 2 | 94 |
| 4 | 89 |
| 6 | 80,5 |
| 8 | 67 |
| 10 | 50 |
| 12 | 35 |
| 14 | 23 |
| 16 | 15 |
| 18 | 9,5 |
| 20 | 6 |
| 25 | 2 |

**Rys. 2.** Fracja torakalna**Tabela 3.****Fracja respirabilna**

| Średnica aerodynamiczna cząstki, μm | Masa frakcji respirabilnej, % |
|--|-------------------------------|
| 0 | 100 |
| 1 | 97 |
| 2 | 91 |
| 3 | 74 |
| 4 | 50 |
| 5 | 30 |
| 6 | 17 |
| 7 | 9 |
| 8 | 5 |
| 10 | 1 |

**Rys. 3.** Fracja respirabilna

Proces ustalania dopuszczalnych wartości narażenia zawodowego dla frakcji wymiarowych aerozoli postępuje stosunkowo wolno. W pierwszym etapie ACGIH wartości ustalone dla pyłu całkowitego zastąpiła wartościami TLV dla frakcji wdychanej, najczęściej bez zmiany ich wartości liczbowych.

Do 2010 r. takiej zamiany dokonano dla ponad 50 substancji chemicznych i pyłów, głównie dla pestycydów, metali i innych. W przypadku nielicznych substancji przyjęto także wartości TLV dla frakcji torakalnej (np. dla kwasu siarkowego). W najbliższych latach należy się spodziewać bardziej intensywnych działań ACGIH w tym kierunku, zarówno w zakresie ustalenia coraz większej liczby wartości TLV dla frakcji wdychanej, jak i nowych wartości dla frakcji torakalnej.

DEFINICJE FRAKCJI WYMIAROWYCH WG PN-EN 481:1988

Nazewnictwo frakcji wymiarowych używane w polskim tłumaczeniu normy PN-EN 481 jest nieadekwatne ani do nazewnictwa międzynarodowego, ani do treści definiowanych pojęć. Oto kilka przykładów: Międzyresortowa Komisja ds. NDS i NDN przyjęła wartość NDS dla frakcji torakalnej kwasu siarkowego (zgodnie z międzynarodową – łacińsko-angielską nazwą tej frakcji). W normie PN-EN 481:1988 taka frakcja nie występuje, można się tylko z trudem domyślać, że jest ona tożsama z frakcją tchawiczną. Nazwa „frakcja tchawiczna” jest niefortunna, bo może być kojarzona wyłącznie z tchawicą oraz łatwo mylona z frakcją tchawiczo-oskrzelową. Frakcję „poza tchawiczną” trudno z kolei skojarzyć z frakcją zatrzymywaną w drogach oddechowych zlokalizowanych w obrębie głowy. Dokładnie nie wiadomo też, jakie są różnice znaczeniowe między słowami „tchawiczna” i „tchawicza”. Nazwa „frakcja wdychana” jest także nieprawidłowa i należy ją zastąpić przez zwrot „frakcja wdychalna”, gdyż lepiej oddaje angielską nazwę tej frakcji *inhalable fraction* lub *inspirable fraction*. Rozróżnienie znaczeń wdychana i wdychalna jest tu tak samo ważne jak rozróżnienie znaczeń substancja: rozpuszczalna, rozpuszczana i rozpuszczona.

W celu ustalania wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS) i potrzeb bieżącego nadzoru nad warunkami pracy należy zrezygnować z nazewnictwa frakcji wymiarowych zawartych w normie PN-EN 481. Norma ta może jednak z powodzeniem funkcjonować jako norma techniczna w zakresie projektowania, budowy i atestowania aparatury pomiarowej.

MOŻLIWOŚCI POMIAROWE FRAKCJI WYMIAROWYCH

Przeprowadzono analizę możliwości pomiarowych frakcji wdychalnej oraz respirabilnej i stwierdzono, że są one obecnie dobre, ponieważ co najmniej kilka firm w Europie i Ameryce oferuje niezbędną do wykonywania takich pomiarów aparaturę. Najmniej są zaawansowane prace w zakresie rozwoju aparatury do pomiarów frakcji torakalnej, ale zapewne w najbliższym czasie dobiegną one do pomyślnego końca. Należy się liczyć z wykorzystaniem pianek syntetycznych o różnej porowatości w charakterze selektorów wstępnych, które umożliwią pobieranie określonej frakcji wymiarowej. Początkowo wydawało się, że dotychczasowe pomiary stężenia pyłu całkowitego będą mogły być traktowane jako stężenia frakcji wdychalnej. Należy jednak zauważyć, że pomiary pyłu całkowitego nie zawsze odzwierciedlają w dostatecznej mierze udział cząstek o rozmiarze $30 \div 100 \mu\text{m}$ we frakcji wdychalnej. Wynika to z niedostatecznego wychwytu tych cząstek podczas pobierania próbek, ich adhezji do ścian głowicy pomiarowej oraz strat pyłu powstających podczas transportu filtrów i ich wyjmowania z głowicy pomiarowej. W niektórych sytuacjach metody te przeszacowują udział cząstek dużych we frakcji wdychalnej (np. pomiary stężenia ołowiu prowadzone w pomieszczeniach o ograniczonej przestrzeni).

Na podstawie wyników badań *Wernera i in.* (1996) stwierdzono, że w większości przypadków masa frakcji wdychalnej jest większa od masy pyłu całkowitego mierzonej metodami tradycyjnymi. W pracy tej podano orientacyjne współczynniki przeliczeniowe pyłu całkowitego na frakcję wdychalną (tab. 4.). W związku z tym istnieje nadzwyczaj pilna potrzeba dokonania przeglądu metod i dostępnej na rynku aparatury pomiarowej, pod kątem ich zgodności z kryteriami oraz definicjami poszczególnych frakcji wymiarowych. Do celów bieżącego nadzoru nad warunkami pracy, kiedy uzyskane wyniki pomiarów porównuje się z obowiązującymi wartościami NDS, powinny być stosowane wyłącznie metody i aparatura do pobierania próbek aerozoli, które te kryteria spełniają.

Tabela 4.

Orientacyjne współczynniki przeliczeniowe pyłu całkowitego na frakcję wdychalną

| Aerozol | Współczynnik przeliczeniowy |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Pyły | 2,5 |
| Mgły (<i>mists</i>) | 2,0 |
| Pyły odlewnicze | 1,5 |
| Dymy spawalnicze | 1,0 |
| Dymy (<i>smokes and fumes</i>) | 1,0 |

PYŁY NIETOKSYCZNE, NIERAKOTWÓRCZE ORAZ NIEPYLICOTWÓRCZE

Istnieje grupa pyłów nierozpuszczalnych w płynach ustrojowych lub słabo rozpuszczalnych, które nie są toksyczne czy są słabo toksyczne i nie wywołują nowotworów ani pylicy płuc, lecz przy dostatecznie dużym stężeniu w środowisku pracy, zazwyczaj powyżej 10 mg/m³, mogą istotnie zmniejszać widzialność i gromadzić się w oczach oraz w uszach, powodując nieprzyjemne odczucia, mogą także uszkodzić skórę lub błony śluzowe na skutek działania chemicznego czy mechanicznego, np. podczas intensywnego czyszczenia skóry. Istnieje problem nazewnictwa tej grupy pyłów. W przeszłości używano w tym celu takich określeń, jak: pyły powodujące uciążliwość, a nawet pyły obojętne dla zdrowia. Obecnie przyjmuje się, że pyły te stanowią ewidentny czynnik szkodliwy dla zdrowia i jeśli znajdują się na listach czynników szkodliwych dla zdrowia, to muszą być nazwane w adekwatny sposób uniemożliwiający swobodną interpretację prawną takiego zapisu. W ACGIH początkowo (od 1964 r.) określano tę grupę pyłów jako *nuisance dusts*, ustalając wartość TLV wynoszącą 15 mg/m³, a w 1972 r. obniżając ją do 10 mg/m³. W 1988 r. pyły te skreślono z listy TLV, a w 1989 r. umieszczono w wykazie TLV pod nazwą PNOC (*particulate not otherwise classified*). W 1995 r. ustalono wartość TLV dla frakcji wdychalnej na poziomie 10 oraz 3 mg/m³ dla frakcji respirabilnej. Od 2001 r. pyły te są określane jako PNOS (*particulate not otherwise specified*). W 2004 r. w ACGIH podjęto weryfikację wartości TLV dla 12 substancji z listy tzw. starych PNOS i 13 innych substancji o niewielkiej rozpuszczalności i toksyczności z zamiarem ustalenia wartości TLV dla konkretnej substancji, a nie dla całej grupy substancji.

NANOCZĄSTECZKI I CZĄSTKI ULTRADROBNE

Nanocząstek o rozmiarach od 1 ÷ 100 nm nie można traktować ani jako cząstek ciał stałych, ani jako cząstek cieczy. Przeważa obecnie pogląd, że nanocząstki stanowią nowy (piąty) stan skupienia materii – nanofazę.

Charakterystyka nanofazy:

- cząstki nanofazy ze względu na usytuowanie większości molekuł przy jej powierzchni są nadzwyczaj reaktywne
- głównym mechanizmem depozycji nanofazy w drogach oddechowych jest dyfuzja
- nanocząstki w organizmie zachowują się w sposób zbliżony do zachowania cząsteczek par, a nie cząstek stałych
- należy rozróżniać nanocząstki od cząstek ultradrobnych. Nanocząstki są to cząstki wyprodukowane intencjonalnie do ściśle określonego obszaru zastosowań, a cząstki ultradrobne powstają samoistnie w procesach wysokotemperaturowych i mają takie same właściwości fizykochemiczne jak nanocząstki
- przeważa pogląd, że cząstki ultradrobne nie powstają w procesach kruszenia i rozdrabniania ciał stałych, a jedynym mechanizmem ich powstawania jest kondensacja par
- źródłem cząstek ultradrobnych są procesy wysokotemperaturowe (np. wytop metali, spawanie) i procesy spalania (np. silniki spalinowe, silniki Diesla)
- ocena narażenia na nanocząstki i cząstki ultradrobne polega obecnie na ocenie stężeń masowych. Stężenia masowe nanofazy są jednak słabo skorelowane ze skutkami biologicznymi. Dla cząstek nanofazy znacznie lepsze kryteria stanowią stężenia liczbowe i powierzchniowe.

W najbliższej przyszłości zaistnieje potrzeba zmiany kryteriów oceny narażenia dla nanocząstek i cząstek ultradrobnych.

ZAMIERZENIA ORGANIZACJI MIĘDZYNARODOWYCH NA NAJBLIŻSZĄ PRZYSZŁOŚĆ

Dotychczasowe konwencje wszystkich frakcji wymiarowych aerozoli zostały oparte na danych eksperymentalnych, w tym także na danych uzyskanych w ściśle kontrolowanych eksperymentach inhalacyjnych na ochotnikach. W konwencjach tych przedstawiono krzywe opisujące wnikanie aerozoli do określonego obszaru w układzie oddechowym jako funkcje rozmiaru cząstek, a od konferencji w Johannesburgu (1959 r.) – jako funkcję średnicy aerodynamicznej w zakresie $0,1 \div 100 \mu\text{m}$. Na podstawie tych konwencji opracowano i wyprodukowano aparaturę niezbędną do pomiaru frakcji wdychalnej, torakalnej i respirabilnej, których masowe stężenia stały się powszechnie stosowanymi kryteriami oceny narażenia zawodowego w skali globalnej.

Od samego początku zdawano sobie jednak sprawę z tego, że korelacje między zachorowalnością na określone choroby a narażeniem mierzonym z zastosowaniem powyższych kryteriów mogą mieć ograniczony charakter. Wynika to przede wszystkim z tego, że zachorowalność na określone choroby nie jest związana z masą aerozolu wnikającego do określonego obszaru czynnościowego w układzie oddechowym, lecz z masą aerozolu zdeponowanego w konkretnym obszarze czynnościowym.

Obecnie zostało już nagromadzone dostatecznie dużo danych dotyczących depozycji aerozoli w układzie oddechowym i dlatego zrodził się pomysł opracowania bardziej zaawansowanych przyrządów do pobierania próbek aerozoli w środowisku pracy i lepiej odzwierciedlających rzeczywiste narażenie na aerozole oraz lepiej korelujące ze skutkami zdrowotnymi.

W 2010 r. w ISO opracowano projekt normy prISO/DIS13138:2010 “Quality – sampling air convention for airborne particle deposition in the human respiratory system”. Projekt ten przedstawia nowe konwencje dla przyrządów do pobierania próbek aerozoli, reprezentujących frakcję aerozolu zdeponowanego w określonym obszarze układu oddechowego. W projekcie uwzględniono

także depozycję cząstek ultradrobnych i nanocząstek o rozmiarach mniejszych od $0,1 \mu\text{m}$. Czy te nowe koncepcje rzeczywiście poprawią korelacje między narażeniem i zachorowalnością jest w tej chwili sprawą całkowicie otwartą. Dlatego norma, która zostanie przyjęta w najbliższym czasie, powinna znaleźć zastosowanie przede wszystkim w obszarze badań naukowych nad zależnościami między narażeniem i skutkami zdrowotnymi. Zmiana dotychczasowych kryteriów oceny narażenia (wartości NDS) mogłaby nastąpić dopiero wówczas, gdyby na rynku pojawiła się niezbędna aparatura pomiarowa, a korelacje między pomiarami narażenia wg nowych koncepcji i skutkami zdrowotnymi byłyby rzeczywiście znacznie lepsze.

Nowe koncepcje ISO dotyczą skuteczności depozycji aerozoli w pięciu konkretnych miejscach (loci) układu oddechowego oznaczonych jako: ET_1 , ET_2 , BB, bb i Alv obliczonych na podstawie matematycznego modelu układu oddechowego opracowanego w 1994 r. przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP). Pięć miejsc w układzie oddechowym to przedni (*anterior*) i tylny (*posterior*) obszar dróg nosowych, pokryte i niepokryte nabłonkiem migawkowym części obszaru tchawiczo-oskrzelowego (BB i bb) oraz obszar pęcherzykowy Alv (obszar wymiany gazowej).

Konwencje składają się z trzech, tzw. niezależnych krzywych skuteczności depozycji w funkcji średnicy termodynamicznej charakteryzujących ruch dyfuzyjny cząstek submikronowych i czterech niezależnych krzywych skuteczności depozycji w funkcji średnicy aerodynamicznej dotyczących cząstek deponowanych pod wpływem siły ciężarowej i siły odśrodkowej. Każda krzywa niezależna jest krzywą średnią z dwunastu innych krzywych obliczonych dla różnych warunków oddychania odpowiadających: pracy w pozycji siedzącej, pracy lekkiej, pracy średniej, pracy ciężkiej, oddychania kobiet i mężczyzn, a także oddychania przez nos lub usta. Dla konwencji termodynamicznych określono ponadto dwie krzywe zależne (proporcjonalne), a dla konwencji aerodynamicznych – jedną krzywą zależną (proporcjonalną). Nowe konwencje zawierają więc dziesięć krzywych ilustrujących skuteczności depozycji aerozoli w pięciu miejscach układu oddechowego i odpowiadające im skuteczności pobierania próbek aerozolu w zależności od rozmiaru cząstek w zakresie $0,005 \div 100 \mu\text{m}$.

WNIOSKI

1. W celu ustalania wartości NDS dla aerozoli przez Międzyresortową Komisję ds. najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy należy przyjąć zmodyfikowane przez *Soderholma* kryteria i definicje frakcji aerozoli ustalone w 1993 r. przez ACGIH/ISO/CEN. Kryteria te są oparte na dostępnych danych doświadczalnych dotyczących wnikania i depozycji aerozoli w układzie oddechowym jako całości i jego poszczególnych obszarach czynnościowych. Kryteria uzyskały międzynarodowe uznanie i są wykorzystywane w procesie ustalania dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego opartych na kryteriach zdrowotnych zarówno w Ameryce, Australii, jak i w Europie.
2. Kryteria i definicje dotyczą trzech frakcji wymiarowych: wdychalnej, torakalnej i respirabilnej.
3. Należy dokonać weryfikacji wykazu wartości najwyższych dopuszczalnych stężeń (NDS) dla substancji chemicznych i czynników pyłowych pod względem ich zgodności z przyjętymi definicjami i kryteriami.

4. Zweryfikowane wartości NDS dla czynników pyłowych należy zamieszczać w wykazie chemicznych czynników szkodliwych dla zdrowia, aby docelowo można było osiągnąć jednolity wykaz czynników chemicznych. Podział na czynniki chemiczne i pyłowe jest podziałem historycznym i sztucznym, wykreowanym w pierwszej połowie ubiegłego stulecia, kiedy przez chemiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia rozumiano przede wszystkim czynniki występujące w środowisku pracy w postaci par i gazów.
5. Należy dokonać przeglądu i oceny aparatury do pobierania próbek i metod oznaczania stężeń frakcji wymiarowych pod kątem ich zgodności z przyjętymi definicjami i kryteriami.
6. Do celów bieżącego nadzoru nad warunkami pracy należy wytypować i zalecić aparaturę oraz metody pobierania próbek, które spełniają przyjęte kryteria i definicje. Należy zdać sobie sprawę z tego, że nawet najnowsze i najbardziej precyzyjne metody analizy próbek aerozoli nie likwidują błędów powstałych podczas ich pobierania.
7. Należy wnikliwie rozpatrywać możliwość ustalenia wartości NDS dla frakcji wdychalnej, torakalnej lub respirabilnej w przypadku opracowywania nowych dokumentacji NDS lub weryfikacji istniejących wartości dla aerozoli.

PIŚMIENNICTWO

- ACGIH (1968) Threshold limit values for airborne contaminants for 1968. Cincinnati.
- ACGIH (1985) Particle size selective sampling in the workplace. Cincinnati.
- ACGIH (1980) Threshold limit values for airborne contaminants for 1988. Cincinnati.
- ACGIH (1995) Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants. 8th ed. Cincinnati.
- Brain J.D., Valberg P.A.* (1979) Deposition of aerosol in the respiratory Tract. AM. Rev. Resp. Dis. 120, 1325.
- Cartwright J., Skidmore J.W.* (1964) The size distribution of dust retained in the lungs of rats and dust collected by size selective samplers. Ann. Occup. Hyg. 7, 151.
- CEN (1992) Size fraction definitions for measurement of airborne particles in the workplace. Brussels.
- CEN (2010) European Standard. prEN ISO 13138. Air Quality Sampling. Conventions for airborne particle deposition in the human respiratory system. ISO/DIS 13138.
- EPA (1987) Ambient air monitoring reference and equivalent methods. Fed. Reg. 52(126), 24724.
- Hath T.F., Gross P.* (1964) Pulmonary deposition and retention of inhaled aerosols. Academic Press, New York.
- IRCP (1994) Human respiratory Tract model for radiological protection. Report of Committee II of IRCP.
- ISO (1994) Air quality-particle size fraction definitions for health-related sampling. Geneva.
- Lippmann M., Yates D.B., Albert R.E.* (1980) Deposition retention, and clearance of inhaled particles. Br. J. Ind. Med. 37, 337.
- PN-EN 481:1988 (1988) Atmosfera miejsca pracy. Określanie składu ziarnowego dla pomiaru frakcji wymiarowych. Warszawa, PKN.
- PN-EN481:1998 (1998) Atmosfera miejsca pracy. Określenie składu ziarnowego dla pomiaru cząstek zawieszonych w powietrzu. Warszawa, PKN.
- Proceedings of the Pneumoconiosis Conference Johannesburg 1959 (1960) Ltd. London.

Soderholm S.C. (1989) Proposed international conventions for particle size-selective sampling. *Ann. Occup. Hyg.* 33, 301.

Werner M.A., Spear T.M., Vincent J.H. (1996) Investigation into impact of introducing workplace aerosol standards based on inhalable fraction. *Analyst.* 121, 1027.

EDWARD WIĘCEK

Health criteria for size-selective aerosol sampling in the working environment

A b s t r a c t

This paper presents some problems associated with aerosol sampling in the working environment in the context of evaluating health risk and compliance with MAC (Maximum Admissible Concentrations). For silicosis and other pneumoconiosis-producing dusts, the fraction deposited in gas-exchange region of the lung is the most interesting one. This paper discusses standards and criteria for respirable dust of BMRC (British Medical Research Council), the Johannesburg International Conference on Pneumoconiosis, AEC (Atomic Energy Commission) and ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). For particles that are deposited in the head and tracheobronchial regions, definitions of size fractions of the ISO Technical Committee 146, ACGIH ASP (Air Sampling Procedures) Committee and U.S. EPA (Environmental Protection Agency) are discussed. Modified by Soderholm particle size-selective sampling criteria for inhalable particulate mass, thoracic particulate mass and respirable particulate mass fractions are recommended for establishing MAC in Poland.