

AEROZOLE BIOLOGICZNE – ROLA NORMATYWÓW HIGIENICZNYCH W OCHRONIE ŚRODOWISKA I ZDROWIA*

BIOLOGICAL AEROSOLS – A ROLE OF HYGIENIC STANDARDS IN THE PROTECTION OF ENVIRONMENT AND HEALTH*

Rafał L. Górny

*Pracownia Zagrożeń Biologicznych, Zakład Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa
Kierownik Pracowni: dr hab. n. med. R.L. Górny*

Streszczenie

Szkodliwe czynniki biologiczne są szeroko rozpowszechnione w licznych przemysłowych i nieprzemysłowych środowiskach. Wiele z tych czynników będąc transportowanych drogą powietrzną może stwarzać znaczne ryzyko dla zdrowia wywołując szereg niekorzystnych reakcji poczynając od alergii, poprzez infekcje, reakcje toksyczne oraz inne niespecyficzne symptomy. Problem prawidłowej ochrony zarówno zdrowia, jak i środowiska może być, jak się wydaje, choć częściowo rozwiązany dzięki zastosowaniu normatywów higienicznych dla aerozoli biologicznych.

W artykule omówiona jest rola normatywów higienicznych dla bioaerozoli w ochronie zdrowia i środowiska. Scharakteryzowane są czynniki biologiczne odpo-

wiedzialne za zanieczyszczenie zarówno powietrza wewnętrznego, jak i zewnętrznego, a przez to za obserwowane efekty zdrowotne u narażonych osób. Opisana jest strategia tworzenia normatywów higienicznych dla bioaerozoli, przedstawiony historyczny i bieżący ich „stan posiadania” zarówno w Polsce, jak i na świecie oraz omówione ograniczenia związane z ich stosowaniem. Ponadto, zaprezentowane są kryteria zarówno medyczne, jak i środowiskowe, jakie są wykorzystywane w procesie tworzenia tego rodzaju normatywów oraz omówione problemy związane z interpretacją danych pomiarowych i dokonywaną na tej podstawie oceną narażenia na aerozole biologiczne.

Słowa kluczowe: *szkodliwe czynniki biologiczne, bioaerozol, normatywy higieniczne, stężenia dopuszczalne*

* Artykuł był prezentowany podczas V Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Rozkład i Korozja Mikrobiologiczna Materiałów Technicznych”, 7-9.09.2009, Łódź, Polska

Nadesłano: 15.09.2009

Zatwierdzono do druku: 15.12.2009

Abstract

Biological agents are ubiquitous in many occupational and non-occupational environments. When transported in the air, they can pose a significant health risk being responsible for numerous adverse outcomes from allergic reactions, through infections and toxic responses, to various nonspecific symptoms. The problem of proper protection of both health and environment can be at least partially solved due to an application of adequate hygienic standards for biological aerosols.

The paper discusses a role of hygienic standards for bioaerosols in protection of environment and health. It characterizes biological agents responsible for a contami-

nation of both the indoor and outdoor air and, by that, for an appearance of health effects in exposed individuals as well as describes a strategy of hygienic standard elaboration. The article lists the existing worldwide standards and limit values for bioaerosols, discusses limitations of these recommendations as well as presents both historical and actual assets in that field in Poland. Moreover, the health-based and environmentally-based strategies applied in a creation process of hygienic standards for biological aerosols are discussed and comments on data interpretation and decision making issues are also given.

Key words: biohazards, bioaerosol, hygienic standards, limit values

*The article was presented during the 5th International Scientific Conference "Microbial Biodegradation and Biodeterioration of Technical Materials", 7-9.09.2009, Łódź, Poland

Szkodliwe czynniki biologiczne – definicja i powszechność oddziaływania

Rozważania dotyczące problemów negatywnego wpływu czynników pochodzenia biologicznego na środowisko, a przez to i na organizm człowieka, należy zacząć od zdefiniowania pojęcia będącego kluczowym w tego rodzaju dyskusji. Czym zatem są szkodliwe czynniki biologiczne? W piśmiennictwie przedmiotu funkcjonuje równolegle kilka ich definicji. Część z nich nie jest poprawna merytorycznie, część dość ograniczona pojęciowo i wieloznaczna językowo. Na potrzeby niniejszych rozważań warto oprzeć się na definicji stworzonej w czasie prac nad Rozporządzeniem Ministra Zdrowia „w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki” [1], która choć do dziś wydaje się najpełniejszą, nie została umieszczona w zaproponowanej formie w wymienionym akcie prawnym. Według niej szkodliwe czynniki biologiczne to: „drobnoustroje (w tym zmodyfikowane genetycznie), hodowle komórkowe, w tym prowadzone w warunkach laboratoryjnych hodowle komórek pochodzących z organizmów wielokomórkowych, wewnętrzne pasożyty ludzkie, zdolne do wywołania zakażenia, alergii lub reakcji toksycznej bezpośrednio lub poprzez wytwarzane przez nie struktury i substancje, a także komórkowe i bezkomórkowe organizmy zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego”. Szkodliwe czynniki biologiczne obejmują zatem szerokie spektrum. Jako, że nie wszystkie spośród nich mogą oddziaływać na środowisko i człowieka będąc transportowanymi drogą powietrzną, na potrzeby tematyki podjętych rozważań uwaga skupiona zostanie jedynie na szkodliwych czynnikach pochodzenia mikrobiologicznego (SCMB).

Zasadnicze pytanie, jakie jest stawiane przy próbie oceny roli SCMB w naszym życiu brzmi: czy czynniki te są dla nas rzeczywiście szkodliwe i na ile to szkodliwe oddziaływanie jest powszechne? Światowe dane w tym względzie są dość jednoznaczne i nie pozostawiają wątpliwości. Zagrożenie zdrowia ludzi ze strony SCMB jest duże i, wbrew powszechnemu przekonaniu, nie ogranicza się wyłącznie do organizmów wysokopatogennych. Jak się ocenia, tylko w Polsce 8 milionów osób w 2,7 milionach (na 11 milionów wszystkich) mieszkań jest zagrożonych alergenami i mikotoksynami grzybów pleśniowych zasiedlających materiały budowlane i wykończeniowe, a 6 milionów osób w 2 milionach mieszkań jest narażonych na działanie grzybów powodujących gnicie drewna budowlanego [2]. Z podobnym stopniem powszechności tego rodzaju zagrożenia mamy do czynienia w środowisku pracy. Według najnowszego raportu Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy [3], co roku w wyniku chorób zakaźnych na całym świecie umiera blisko 320.000 pracowników, z czego około 5000 na terenie Unii Europejskiej. Na przykład w Wielkiej Brytanii szacuje się, że każdego roku u około 200 osób rozpoznaje się niekorzystne skutki zdrowotne powodowane przez kontakt z SCMB, czego konsekwencją – oprócz wyżej wymienionych – są społeczne koszty szacowane na około 100 milionów funtów rocznie.

Szereg mikroorganizmów posiadając zdolność wzrostu i kolonizowania materiałów zarówno naturalnych, jak i sztucznych, tych pochodzenia organicznego, jak i nieorganicznych, powoduje nie tylko ich biodegradację i biodeteriorację, ale i poprzez dostarczenie do powietrza szeregu szkodliwych struktur i substancji wykazujących immunologiczną reaktywność, może niekorzystnie oddziaływać na organizmy osób na nie narażonych. Jest to szcze-

gólnie ważne w przypadku mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza, gdzie często narażenie na wysokie stężenia aerozoli biologicznych powoduje inicjację szeregu immunopatogennych reakcji. Z jak wielką ich liczbą mamy do czynienia świadczy fakt, że klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych występujących w środowisku pracy, opublikowana w Polsce w wydaniu książkowym, uwzględnia 650 czynników (czyli o 275 więcej w porównaniu z listą zawartą w Dyrektywie 2000/54/WE [4]) i należy oczekiwać, że ich rzeczywista liczba okaże się w przyszłości znacznie większa [5].

Aerozole biologiczne (bioaerozole)

Czynniki biologiczne najpowszechniejsze zagrożenie w środowisku stwarzają będąc transportowane drogą powietrzną jako bioaerozol [6, 7]. Czym zatem jest bioaerozol czyli aerozol biologiczny? Zgodnie z definicją, terminem „bioaerozol” określa się „zbiór cząstek biologicznych rozproszonych w powietrzu lub innej fazie gazowej”. Cząstkami aerozolu biologicznego mogą być [8]:

- pojedyncze spory, pyłki roślin, komórki bakteryjne lub wirusy;
- agregaty utworzone z kilku spor, komórek lub innego materiału biologicznego (np. alergenów ssaków);
- produkty lub fragmenty spor i komórek bakteryjnych oraz grzybowych (np. endotoksyny, mikotoksyny);
- materiał biologiczny unoszony samoistnie lub niesiony przez niebiologiczną cząstkę (np. cząstkę pyłu).

W powietrzu mogą znajdować się zarówno żywe, jak i martwe komórki mikroorganizmów. Należy podkreślić, że termin „żywy” odnosi się do bioaerozolu *in statu nascendi*, ponieważ cząstki biologiczne po przejściu do postaci aerozolowej, tzn. będąc zawieszonymi w powietrzu, mogą być obecne w obu tych formach [9]. Przedział średnic aerodynamicznych cząstek aerozoli biologicznych, obejmuje wielkości od nanometrycznych (np. endotoksyny bakteryjne), poprzez submikronowe (np. fragmenty komórek bakteryjnych lub grzybowych), po cząstki, których średnica może przekraczać 100 µm (np. pyłki roślin) [7].

Szkodliwy czynnik biologiczny a organizm człowieka

Pod względem rodzaju działania chorobotwórczego na organizm człowieka, SCMB występujące w postaci aerozoli można podzielić na następujące grupy [10, 11]:

- czynniki wywołujące choroby zakaźne i inwazyjne (np. wirusy, bakterie, grzyby),

- alergeny (bakteryjne, grzybowe),
- toksyny i związki o podobnym do nich działaniu (np. egzo- i endotoksyny bakteryjne, mikotoksyny, glukany, lotne związki organiczne),
- czynniki rakotwórcze (np. aflatoksyny wytwarzane przez niektóre grzyby z rodzaju *Aspergillus*),
- fragmenty („drobne” tj. submikronowe i nanometryczne cząstki bakterii i grzybów).

W zależności od stopnia zagrożenia, szkodliwe czynniki biologiczne zostały podzielone na cztery grupy [1, 4]:

- grupa 1 – czynniki, przez które wywołanie chorób u ludzi jest mało prawdopodobne;
- grupa 2 – czynniki, które mogą wywoływać choroby u ludzi, mogą być niebezpieczne dla pracowników, ale rozprzestrzenianie ich w populacji ludzkiej jest mało prawdopodobne i zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia;
- grupa 3 – czynniki, które mogą wywołać u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, rozprzestrzenianie się ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne i zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia;
- grupa 4 – czynniki, które wywołują u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, rozprzestrzenianie się ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne i zazwyczaj nie istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia.

Większość SCMB jest obecna w środowisku w postaci cząstek. Ta właśnie cecha determinuje ich zachowanie oraz dynamikę w powietrzu i decyduje o miejscu ich depozycji w określonej przestrzeni czy na powierzchni. W przypadku aerozoli, SCMB przy przedostawaniu się do organizmu mogą wykorzystywać w zasadzie trzy drogi, tj. przez naskórek (głównie rąk) i nabłonek (nosa, ust i spojówek) oraz oskrzela i pęcherzyki płucne [6]. Od wielkości, kształtu, gęstości, składu chemicznego i reaktywności cząstki zależy jak głęboko, tj. do jakiego piętra układu oddechowego ona dotrze i jak się tam zachowa. Oprócz wymienionych parametrów, na mechanizm osadzania się cząstek wpływa też szybkość przepływu powietrza, sposób oddychania oraz wielkość wentylacji płuc uzależniona od wieku i dynamiki wykonywanej przez daną osobę czynności [12].

Kontrola stanu higienicznego środowiska i zdrowia – zasady tworzenia normatywów

Każdy czynnik biologiczny, którego obecność w środowisku jest niepożądana może zostać uznany za jego zanieczyszczenie. Choć żadne środowisko

(poza specjalnie tworzonymi, np. w przemyśle farmaceutycznym, biotechnologicznym, placówkach naukowych czy obiektach służby zdrowia) nie jest sterylne i wolne od zanieczyszczeń, obecność wielu SCMB w niskich stężeniach może być uznana za normalną. Problem kontaminacji może natomiast pojawić się, gdy poziom zanieczyszczeń wzrośnie ponad pewną granicę, przyjętą dla danego środowiska, za normalną dla jego tła. Z taką właśnie sytuacją mamy często do czynienia w przypadku mikrobiologicznego zanieczyszczenia środowiska.

Ze względu na ograniczoną dostępność danych, opisujących relację między stężeniem SCMB a efektem zdrowotnym wywołanym jego działaniem, normy lub ich propozycje, o ile w ogóle są opracowane na tej bazie, nie mają w praktyce powszechnego zastosowania. Większość dostępnych standardów czy rekomendacji budowana jest na podstawie obrazu klinicznego choroby(ób), wywołanej(ych) działaniem danego czynnika biologicznego i przy uwzględnieniu dostępności metod jego pobierania, zastosowania działań remediacyjnych oraz zapobiegawczych bez wyznaczania limitów ilościowych dla stężenia czynnika w powietrzu. Niemniej jednak istnieją w piśmiennictwie przedmiotu dość liczne liczbowe wartości standardów, norm lub propozycji wartości dopuszczalnych, które pomagają interpretować uzyskane empirycznie dane pomiarowe. Mają one zazwyczaj charakter arbitralny lub względny. Kluczowe parametry i ich współzależność w procesie tworzenia normatywów dla bioaerozoli ilustruje rycina 1.

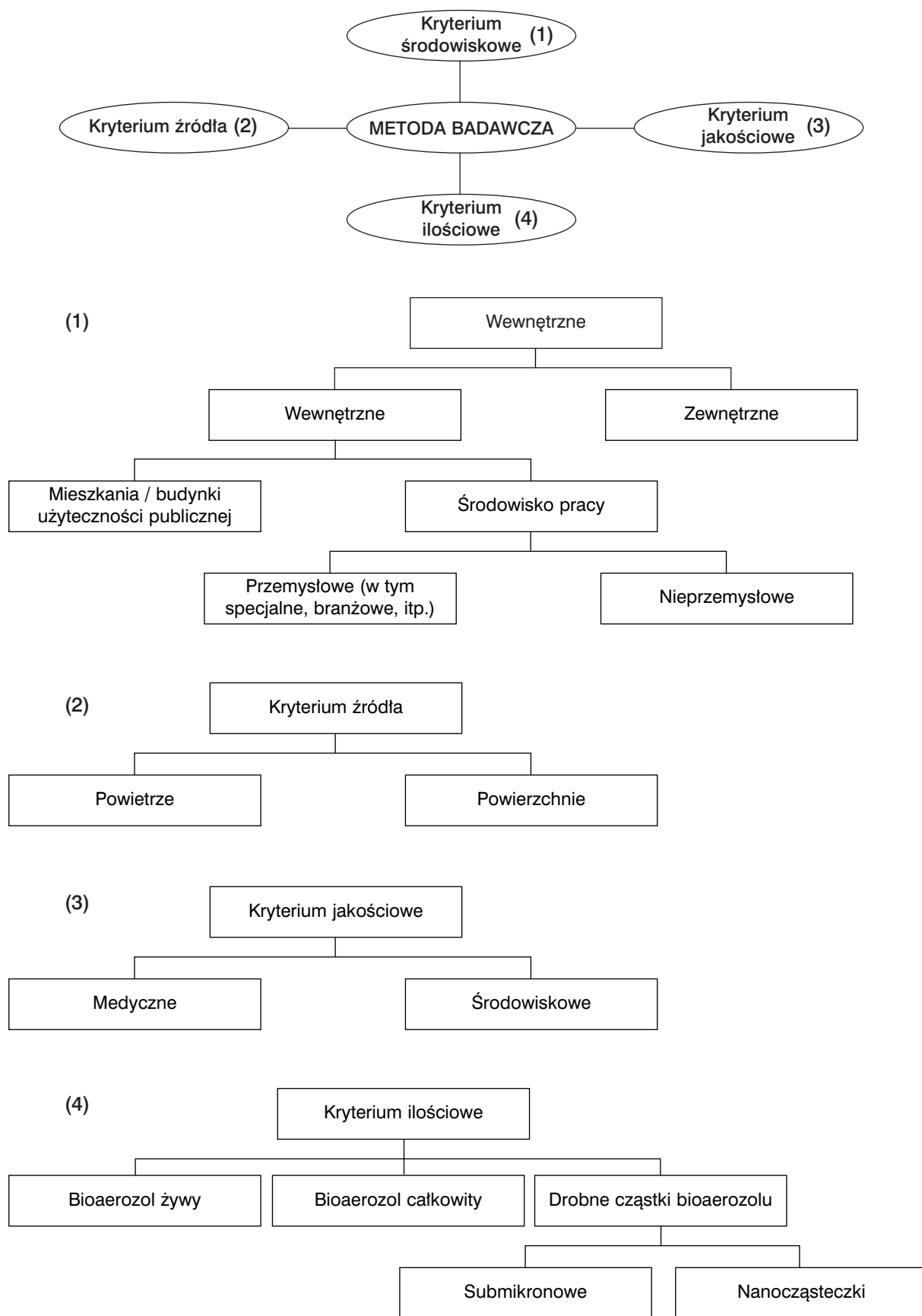
W arbitralnie wyznaczonych wartościach normatywów określono poziomy stężenie czynników biologicznych (np. dla całości mikroflory lub dla specyficznego gatunku), które uznaje się za „akceptowalne” lub „nieakceptowane”. Są one zazwyczaj wyznaczane przez indywidualnych badaczy czy grupy naukowców/ekspertów lub są one określane na podstawie wyników przekrojowych badań prowadzonych w „normalnych” środowiskach bez odniesienia do specyficznych skutków zdrowotnych wywołanych ich oddziaływaniem (tj. nie precyzują relacji między dawką a odpowiedzią organizmu). Określają one poziomy stężenie, które „zazwyczaj” występuje w danym środowisku lub jego części i każde, stwierdzone pomiarem, przekroczenie tak wyznaczonej wartości jest traktowane jako „niezwykłe” i wskazuje na możliwość występowania dodatkowego źródła zanieczyszczenia. Arbitralne wartości są też określane (zwykle na poziomie równym lub zbliżonym poziomowi detekcji stosowanej metody) dla mikroorganizmów (np. grzybów), które wywołują poważne skutki zdrowotne [13].

W ustalaniu względnych wartości normatywów wykorzystuje się zwykle relacje między stężeniami

czynników biologicznych w próbkach mierzonych równoległe w środowisku wewnętrznym i zewnętrznym. Przyjmuje się zasadę, że jeżeli wartości stężeń w środowisku wewnętrznym są mniejsze od tych w środowisku zewnętrznym, to stan środowiska wewnątrz oceniany jest jako „dobry” lub „akceptowalny”. Stosunek stężeń wewnątrz/zewnątrz świadczy też o ewentualnym istnieniu wewnętrznych źródeł emisji. Względne metody oceny stosuje się też podczas porównywania jakościowego, bądź przy konfrontacji częstości występowania np. określonych rodzajów lub gatunków mikroorganizmów.

W interpretacji danych pomiarowych bioaerozoli powszechnie przyjętym jest posługiwanie się wartościami stężeń mikroorganizmów żywych. Niemniej jednak należy zwrócić uwagę na fakt, że w powietrzu mogą znajdować się nie tylko mikroorganizmy żywe, zdolne do tworzenia kolonii, ale i żywe niezdolne do ich tworzenia, martwe drobnoustroje oraz różnej wielkości fragmenty komórek mikroorganizmów. Dwie środkowe grupy stanowią zwykle znaczącą część bioaerozolu, gdyż powietrze atmosferyczne nie jest środowiskiem stwarzającym dogodne warunki do ich wzrostu i rozwoju. Ocenia się na podstawie badań prowadzonych dotychczas w różnych środowiskach, że „żywy” bioaerozol stanowi od 0,3% do maksymalnie 25% tzw. bioaerozolu całkowitego. Uwzględniając obecność fragmentów w bioaerozolu, różnica ta staje się jeszcze bardziej wyraźna, bowiem liczba tych submikronowych struktur mikroorganizmów może nawet kilkusetkrotnie przekraczać liczbę cząstek wchodzących w skład bioaerozolu całkowitego [9, 12]. Mimo tego, już dziś dość pokaźnego zasobu wiedzy dotyczącego ilościowych relacji w składzie aerozoli biologicznych, problemem nadal pozostaje interpretacja tego rodzaju danych. Nie ma dotąd bowiem wypracowanych kryteriów higienicznej oceny środowisk, bazujących zarówno na wartościach całkowitych stężeń cząstek mikroorganizmów, jak i na wartościach liczbowych ich submikronowych fragmentów.

Immanentną częścią każdego tworzonych normatywu jest jego komponenta techniczna, dotycząca metody badawczej zastosowanej w celu wyznaczenia wartości liczbowej danego standardu. Mówiąc w największym skrócie, tradycyjne metody pobierania i analizy aerozoli bakteryjnych i grzybowych polegają na ocenie ilościowej i jakościowej komórek wegetatywnych lub spor mikroorganizmów. Taki pomiar zawieszonych w powietrzu cząstek trwa zwykle względnie krótko i może nie do końca właściwie odzwierciedlić jakość powietrza. Metody oceny narażenia opierające się wyłącznie na konwencjonalnym (wolumetrycznym) pobieraniu próbek powietrza, choć merytorycznie uzasadnione,



Rycina 1. Kluczowe parametry i ich współzależność w procesie tworzenia normatywów dla bioaerozoli.
Figure 1. Key factors and their interrelation in the bioaerosol standard creation process.

mogą nie dość rzetelnie odzwierciedlać stopień zanieczyszczenia mikrobiologicznego i stąd mogą być traktowane tylko w przybliżeniu jako wyznacznik poziomu narażenia. W wielu bowiem sytuacjach, pobranie próbki powietrza nie jest wystarczające dla identyfikacji problemów związanych z mikrobiologicznym zanieczyszczeniem lub wyznaczeniem wzajemnego powiązania między nim a skutkiem zdrowotnym przezeń indukowanym. Częściowo dzieje się tak dlatego, iż tego typu pomiar, który ze swej natury jest ograniczony w czasie i bywa usytuowany w miejscu nierzadko oddalonym o kilka lub kilkanaście metrów od źródła emisji, nie zawsze adekwatnie reprezentuje najwyższe możliwe stężenie mierzonego czynnika mikrobiologicznego w środowisku. Zatem, szacowanie ryzyka związanego z narażeniem na bioaerozole powinno zawierać jako swą stałą część identyfikację źródła mikroorganizmów i, jeśli to tylko jest możliwe, pomiar zdolności emisyjnej SCMB w tymże źródle. Niestety w obecnej chwili (poza kilkoma prototypowymi rozwiązaniami) nie istnieją na rynku przyrządy pozwalające na wykonywanie tego rodzaju pomiarów.

Gdzie jesteśmy w 2009 roku – światowy i krajowy „stan posiadania”

Analiza dostępnych w piśmiennictwie przedmiotu wartości normatywów dla bioaerozoli pozwala określić zakresy wartości stężeń, jakie zostały zaproponowane przez organizacje, instytucje, krajowe komitety specjalistów, niezależne grupy badaczy lub indywidualnych naukowców na przestrzeni ostatnich blisko 140 lat. Wszystkie te liczbowe wartości standardów, norm lub propozycji wartości dopuszczalnych, pomagające interpretować uzyskane empirycznie dane pomiarowe, mają charakter zarówno wartości arbitralnych, jak i względnych. Szeroki przegląd tychże propozycji, w tym dla szeregu SCMB tj. bakterii, grzybów, substancji pochodzenia drobnoustrojowego oraz środowisk specjalnych i tych, w których wymagana jest wysoka czystość powietrza można znaleźć w publikacjach m.in. Brandysa i Brandys [14] oraz Górnego [13]. W odniesieniu do poszczególnych SCMB wartości te przedstawiają się następująco (skrót „jtk” oznacza „jednostkę tworzącą kolonię”, czyli liczbę komórek lub agregatów komórek mikroorganizmów zdolnych do wyrośnięcia na odpowiedniej pożywce w postaci oddzielnej kolonii):

a) dla ogólnej liczby bakterii:

$\leq 1,0 \times 10^3 \div \leq 7,0 \times 10^3$ jtk/m³ dla pomieszczeń mieszkalnych i nieprzemysłowego środowiska pracy oraz

$\leq 7,5 \times 10^2 \div 1,0 \times 10^7$ jtk/m³ dla powietrza pomieszczeń produkcyjnych i przemysłowych, przy

czym przyjmuje się, że we wszystkich pomieszczeniach dla patogennych mikroorganizmów nie ma poziomu bezpiecznego (norma powinna wynosić 0 jtk/m³),

b) dla bakterii Gram-ujemnych:

$1,0 \times 10^3 \div 2,0 \times 10^4$ jtk/m³ dla powietrza pomieszczeń produkcyjnych i przemysłowych,

c) dla endotoksyn bakteryjnych: 0,005 ÷ 0,2 µg/m³ dla powietrza pomieszczeń produkcyjnych i przemysłowych,

d) dla grzybów: $1,0 \times 10^1 \div 1,0 \times 10^4$ jtk/m³ dla pomieszczeń mieszkalnych i nieprzemysłowego środowiska pracy oraz $< 1,0 \times 10^2 \div 1,0 \times 10^7$ jtk/m³ dla powietrza pomieszczeń produkcyjnych i przemysłowych, przy czym przyjmuje się tak, jak w przypadku ogólnej liczby bakterii, że w żadnych z tych środowisk dla patogennych mikroorganizmów nie ma poziomu bezpiecznego (norma powinna wynosić 0 jtk/m³),

e) dla subtylezyny: 0,06 µg/m³ dla powietrza pomieszczeń produkcyjnych i przemysłowych.

W pomieszczeniach specjalnych, tj. pomieszczeniach szpitalnych i pomieszczeniach czystych w działaniu, wartości norm mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza powinny mieścić się odpowiednio w zakresach: $1,0 \times 10^0 \div \leq 4,0 \times 10^3$ jtk/m³ i $< 1,0 \times 10^0 \div 1,0 \times 10^3$ jtk/m³. W wypadku wnętrz, w których jest wymagana podwyższona sterylność, tak jak ma to miejsce w przypadku pomieszczeń czystych w działaniu, w normach określane są zazwyczaj nie tylko dopuszczalne wartości stężeń SCMB w powietrzu, lecz i zalecane limity zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni.

Ze względu na różnorodność spotykanych gatunków i rodzajów mikroorganizmów, w piśmiennictwie przedmiotu stosunkowo rzadko pojawiają się propozycje oceny zanieczyszczenia mikrobiologicznego instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Jedną z takich propozycji opracowaną przez badaczy z Włoch, dotyczącą grzybów pleśniowych oraz bakterii, zamieszczono w tabeli I [9].

Polskie unormowania higieniczne dotyczące aerozoli biologicznych

Kontrola czystości mikrobiologicznej powietrza w prawodawstwie polskim nie jest wciąż traktowana z należytą uwagą mimo, że pierwsze próby określenia dopuszczalnego mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza były czynione już przeszło sto lat temu. Pod koniec XIX wieku Bujwid sprecyzował pierwszą propozycję normy, określając maksymalne zanieczyszczenie powietrza mieszkalnego na „50 bakterii w 1 litrze”. Kolejna propozycja pojawiła się dopiero na początku lat 70. Stosując metodę sedymentacyjną, Krzysztofik określił „do-

puszczalny stopień mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego (atmosferycznego) i pomieszczeń użytkowych” na podstawie pomiarów „ogólnej” liczby mikroorganizmów, liczby mikroorganizmów hemolizujących oraz „ogólnej” liczby grzybów. Pierwsze polskie normy, dotyczące badań mikrobiologicznych w kierunku ochrony czystości powietrza, powstały prawie 100 lat po pierwszej propozycji Bujwida. Był to zestaw pięciu aktów prawnych określających „wytyczne i postanowienia ogólne dotyczące pobierania próbek powietrza atmosferycznego” (PN-84/Z-04008/02 i PN-89/Z-04008/08), „metody badań mikrobiologicznych powietrza” (PN-89/Z-04111/01), w tym „oznaczanie liczby bakterii i grzybów mikroskopowych w powietrzu atmosferycznym przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną” (PN-89/Z-04111/02 i PN-89/Z-04111/03). Wszystkie wymienione akty prawne dotyczyły wyłącznie powietrza atmosferycznego (emisji) i od czasu ich wprowadzenia w życie nie wypracowano żadnych

innych propozycji, które opisywałyby metody badań mikrobiologicznych powietrza i określałyby najwyższe dopuszczalne stężenia mikroorganizmów w środowisku. Po akcesji Polski do Unii Europejskiej, obowiązującym aktem prawnym stała się Dyrektywa 2000/54/WE „w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy” określająca obowiązki pracodawcy w zakresie ochrony pracowników przed działaniem czynników biologicznych. Postanowienia zawarte w Dyrektywie 2000/54/WE zostały wdrożone do prawa polskiego odnośnym zapisem w Kodeksie Pracy oraz poprzez Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 2005 r. Logiczną konsekwencją prac nad przyjęciem i wprowadzeniem do polskiego systemu prawnego postanowień Dyrektywy 2000/54/WE jest toczące się systematyczne przyjmowanie wymienionych poniżej norm europejskich, regulujących m.in. zagadnienia pomiarów bioaerozoli w środowisku pracy.

Tabela I. Stężenia mikroorganizmów [jtk/m³] występujących w powietrzu wewnątrz instalacji wentylacyjnych i klimatyzacyjnych.

Table I. Concentration of microorganisms [cfu/m³] in the air in ventilation and air-conditioning systems.

Mikroorganizmy	Stężenie	Ocena higieniczna
Bakterie	patogenne < 50	występowanie niedopuszczalne bardzo niskie stężenie
	51–100	niskie stężenie
	101–500	średnie stężenie
	501–2000	wysokie stężenie
	> 2000	bardzo wysokie stężenie
Grzyby	patogenne > 50	występowanie niedopuszczalne niezależnie od stężenia niedopuszczalne w przypadku występowania tylko jednego rodzaju
	≤150	dopuszczalne w przypadku występowania większej liczby rodzajów
	≥300	dopuszczalne jeśli głównymi rodzajami są <i>Cladosporium</i> lub <i>Philloplane</i>

W Polsce, warunki pobierania mikrobiologicznych próbek powietrza na stanowiskach pracy w odniesieniu do mikroorganizmów (ich całkowitej liczby oraz liczby mikroorganizmów zdolnych do wzrostu) i endotoksyn bakteryjnych określa Polska Norma PN-EN 13098 przyjęta przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) w 2002 r. (i zastąpiona w 2007 r.): „Powietrze na stanowiskach pracy – Wytyczne dotyczące pomiaru mikroorganizmów i endotoksyn zawieszonych w powietrzu”. Norma ta zawiera podstawowe definicje, podaje zalecenia dotyczące pobierania próbek metodami wolumetrycznymi,

dopuszczając możliwość oceny stopnia mikrobiologicznego skażenia powietrza przez oznaczenie składników komórek mikroorganizmów (endotoksyn, glukanów) oraz pierwotnych (ATP) i wtórnych (mikotoksyny) metabolitów. Kolejnym aktem prawnym jest przyjęta przez PKN w 2004 r. (i zastąpiona w 2006 r.) Polska Norma PN-EN 14031 „Powietrze na stanowiskach pracy – Oznaczanie endotoksyn zawieszonych w powietrzu”. W normie tej określono wytyczne do oceny narażenia na endotoksyny zawieszane w powietrzu na stanowiskach pracy. Przedstawiono w niej metody pobierania, transpor-

tu, przechowywania i oznaczania endotoksyn. W tym samym roku PKN uznał Normę Europejską „Powietrze na stanowiskach pracy – Przewodnik użytkownika i stosowania procedur do oceny narażenia na czynniki chemiczne i biologiczne” za Polską Normę PN-EN 14042. Norma ta zawiera wytyczne dotyczące procedur wyboru, zastosowania i obsługi przyrządów pomiarowych stosowanych do pobierania czynników chemicznych i biologicznych na stanowiskach pracy, w środowisku zewnętrznym i nieprzemysłowym środowisku wewnątrz. Podaje ona zasady doboru procedur pomiarowych i przyrządów, charakterystyki działania poborników wraz z opisem metod pobierania oraz praktyczne zasady ich stosowania w pomiarach osobistych i stacjonarnych. W odniesieniu do czynników biologicznych omawia metody pomiaru zawieszonych w powietrzu mikroorganizmów i endotoksyn z zastosowaniem impaktorów, impingerów i poborników z filtrem. Wreszcie, Polska Norma PN-EN 14583 przyjęta przez PKN w 2005 r. (i zastąpiona w 2008 r.) „Powietrze na stanowiskach pracy – Wolometryczne

urządzenia do pobierania próbek bioaerozolu – wymagania i metody badań” określa natomiast wymagania i metody testowania służące wyznaczeniu sprawności poborników wolometrycznych używanych dla szacowania bioaerozoli na stanowiskach pracy.

Jak wspomniano wcześniej, obecnie nie istnieją powszechnie obowiązujące normatywy dotyczące wartości dopuszczalnych stężeń mikroorganizmów, choć od wielu lat naukowcy i eksperci z różnych krajów próbują je formułować. W 2004 roku, Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych (ZECB) Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy zaproponował przyjęcie zalecanych wartości dopuszczalnych stężeń najpowszechniejszych kategorii mikroorganizmów i endotoksyny bakteryjnej w powietrzu pomieszczeń (tabela II) [13, 15]. Zalecenia te, stosowane już od kilku lat w Polsce, mogą być pomocne nie tylko przy ocenie narażenia na SCMB w środowisku pracy czy wewnątrz, ale i dla podjęcia

Tabela II. Propozycje zalecanych stężeń drobnoustrojów i endotoksyny w powietrzu pomieszczeń opracowane przez Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych.

Table II. Limit value proposals for microorganisms and endotoxin elaborated by Biological Agents Expert Group.

Czynnik mikrobiologiczny	Dopuszczalne stężenie	
	Pomieszczenia robocze zanieczyszczone pyłem organicznym	Pomieszczenia mieszkalne i użyteczności publicznej
Bakterie mezofilne	$1,0 \times 10^5$ jtk/m ³ *	$5,0 \times 10^3$ jtk/m ³
Bakterie Gram-ujemne	$2,0 \times 10^4$ jtk/m ³ *	$2,0 \times 10^2$ jtk/m ³
Termofilne promieniowce	$2,0 \times 10^4$ jtk/m ³ *	$2,0 \times 10^2$ jtk/m ³
Grzyby	$5,0 \times 10^4$ jtk/m ³ *	$5,0 \times 10^3$ jtk/m ³
Czynniki z 3. i 4. grupy zagrożenia	0 jtk/m ³	0 jtk/m ³
Endotoksyna bakteryjna	200 ng/m ³ (2000 JE/m ³) *	5 ng/m ³ (50 JE/m ³)

* dla frakcji respirabilnej proponowane wartości powinny być o połowę niższe
jtk – jednostka tworząca kolonię
JE – Jednostka Endotoksyczna

odpowiednich działań profilaktycznych i prewencyjnych w tych środowiskach.

W odniesieniu do powietrza zewnętrznego nadal obowiązują w naszym kraju dwie Polskie Normy dotyczące stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego bakteriami (PN-Z-04111-02:1989) i grzybami (PN-Z-04111-03:1989). Niestety, oba te akty prawne nie uwzględniają nowoczesnego (tj. zgodnego z obecnym stanem wiedzy) podejścia do

zagadnienia czystości mikrobiologicznej powietrza, błędnie dopuszczając stosowanie w ocenie ilościowej bioaerozoli metody sedymentacyjnej. Przygotowana pod koniec 2007 r. dla PKN nowelizacji tychże norm jest ciągle „na etapie dyskusji”. Nowelizacja ta, w aspekcie metodycznym, łączy w sobie propozycje zawarte w trzech Polskich Normach tj. PN-EN: 13098, 14031 i 14042, podając sposób interpretacji otrzymanych empirycznie wyników w celu oce-

ny zanieczyszczenia powietrza SCMB. Według niej oceny stopnia zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego bakteriami, grzybami i endotoksynami można dokonać zarówno na podstawie mikrobiologicznych badań ilościowych, jak i jakościowych bioaerozolu. W ocenie ilościowej przyjęto założenie, że stężenie poszczególnych składników bioaerozolu w powietrzu atmosferycznym nie powinno przekraczać wartości dopuszczalnych stężeń dla powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych (zaproponowanych przez ZECB – patrz tabela II), tj. w środowisku, w którym człowiek spędza większość swego czasu w ciągu życia. Jeśli podane wartości stężeń w odniesieniu do poszczególnych grup badanych

składników bioaerozolu zostaną przekroczone, powietrze atmosferyczne należy uznać za „zanieczyszczone mikrobiologicznie”, a stan taki za „nie do zaakceptowania”. Jeżeli zmierzone stężenia będą równe lub niższe od zaproponowanych wartości, mikrobiologiczne zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego należy uznać za „akceptowalne”. Proponowane w omawianej nowelizacji i przedstawione w tabeli III stopnie zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza atmosferycznego mają charakter zbliżony do arbitralnego, tj. zostały wypracowane w wyniku pomiarów środowiskowych z uwzględnieniem potencjalnej szkodliwości określonego składnika bioaerozolu i powinny być traktowane ja-

Tabela III. Propozycje oceny stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza atmosferycznego.
Table III. Proposals for the assessment of microbial contamination of outdoor air.

Składnik bioaerozolu	Stopień zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego	
	Akceptowalny	Nieakceptowalny
Bakterie (razem)	≤ 5000 jtk/m ³	> 5000 jtk/m ³
Bakterie Gram-ujemne	≤ 200 jtk/m ³	> 200 jtk/m ³
Termofilne promieniowce	≤ 200 jtk/m ³	> 200 jtk/m ³
Grzyby	≤ 5000 jtk/m ³	> 5000 jtk/m ³
Czynniki z 3. i 4. grupy zagrożenia	0 jtk/m ³	0 jtk/m ³
Endotoksyna	≤ 50 JE/m ³	> 50 JE/m ³

jtk – jednostka tworząca kolonię
JE – Jednostka Endotoksyczna

ko norma fakultatywna lub pomocnicze wartości referencyjne.

Jeżeli ocena stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza atmosferycznego została dokonana równocześnie więcej niż jedną metodą, a zastosowane techniki pobierania próbek dały różne wartości stężeń cząstek bioaerozolu, w ocenie stopnia zanieczyszczenia należy oprzeć się na najwyższej stwierdzonej wartości stężenia wyrażonej jako jtk/m³. Jeżeli metoda pobierania cząstek mikrobiologicznych z powietrza atmosferycznego umożliwia wyznaczenie tzw. całkowitej liczby mikroorganizmów (zarówno żywych, jak i martwych razem) może ona być zastosowana jako znaczące, dodatkowe źródło informacji o stężeniu w powietrzu immunologicznie reaktywnych cząstek. W przypadku emisji do powietrza zanieczyszczeń mikrobiologicznych z określonych obiektów należy dodatkowo przeprowadzić badania uzupełniające mikroorganizmów wskaźnikowych, charakterystycznych dla powyższych źródeł. I odwrotnie, jeżeli przeprowadzona analiza jakościowa bioaerozolu umożliwiła szczegółową charakterystykę rodzajową lub gatunkową, to

identyfikacja wśród nich mikroorganizmów wskaźnikowych może dostarczyć informacji o punktowych emitatorach mikrobiologicznych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego.

Kryteria kliniczne w tworzeniu normatywów higienicznych – solidna podstawa czy fiasko koncepcji?

Mikroorganizmy mogą powodować wystąpienie szeregu niekorzystnych efektów zdrowotnych począwszy od reakcji alergicznych, przez infekcje, po reakcje toksyczne oraz inne niespecyficzne symptomy, często związane ze środowiskiem wewnątrz i określane jako „syndrom chorego budynku”, „syndrom szczelnego budynku” czy „choroba związana z budynkiem”. Uwzględniając ten fakt, idealną sytuacją byłoby tworzenie normatywu higienicznego w oparciu o relację między narażeniem (opisanym poprzez rodzaj i stężenie SCMB), a skutkiem zdrowotnym nim wywołanym. Związek ten powinien być istotny z epidemiologicznego punktu widzenia i potwierdzony zarówno eksperymentalnie (ekspozycja

w warunkach laboratoryjnych), jak i praktycznie (pomiar czynnika szkodliwego w środowisku, w którym nastąpiło narażenie). O ile pierwszy postulat jest zazwyczaj spełniony poprzez zwrócenie uwagi na dany czynnik szkodliwy w momencie zaistnienia niekorzystnego zdarzenia zdrowotnego, o tyle drugi warunek jest zwykle nie do spełnienia *post factum*. Ponadto, w przypadku narażenia drogą inhalacyjną (a z taką właśnie mamy do czynienia w przypadku bioaerozoli), związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy liczbą zainhalowanych cząstek a wywołaniem przez nie niekorzystnych efektów zdrowotnych nie jest ciągle wyznaczony i wciąż budzi kontrowersje w wielu aspektach. Przykładem może tu być mikologiczne zanieczyszczenie środowiska wewnątrz, gdzie równolegle można zaobserwować zjawiska, w których stwierdzone klinicznie problemy zdrowotne związane z krótkotrwałą ekspozycją na niskie stężenia spor grzybów w zawilgoconych budynkach współlistnieją z sytuacjami, w których codzienne kontakty ze stosunkowo wysokimi stężeniami tego rodzaju czynników szkodliwych nie manifestują się podobnymi objawami [12].

Podejście środowiskowe w tworzeniu normatyw higienicznych

W sytuacji, gdy stężenie badanego SCMB i związany z nim niekorzystny efekt zdrowotny nie mogą zostać skutecznie wyznaczone, wówczas poprzez wielokrotny pomiar stężenia tegoż czynnika można stworzyć normatyw higieniczny, który pozwoli ocenić jakość (czystość/stożenie zanieczyszczenia) badanego środowiska, a przez to ustalić, co dla danego środowiska (lub określonego jego elementu) jest „typowe i akceptowalne”, a co jest „nietyczne i nieakceptowalne”. Zaprezentowane wcześniej w artykule i stosowane z powodzeniem od kilku już lat polskie propozycje wartości normatyw higienicznych dla bakterii, grzybów i endotoksyny bakteryjnej w pomieszczeniach roboczych zanieczyszczonych pyłem organicznym, pomieszczeniach mieszkalnych i użyteczności publicznej oraz te, zaproponowane dla oceny stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza atmosferycznego, oparte są na teźże właśnie koncepcji. Zaprezentowane powyżej podejście zwane „filozofią środowiskową” jest – jak się wydaje – kuszącą alternatywą wobec podejścia „klinicznego”, zakładającego dość restrykcyjne (i dziś wciąż nie do spełnienia) warunki wymagające opisu relacji między dawką szkodliwego czynnika, a odpowiedzią ze strony organizmu manifestującą się dokładnie określonym skutkiem zdrowotnym. W obliczu braku w przewidywalnej

przyszłości szansy na wypracowanie dla SCMB (poza endotoksyną bakteryjną, dla której w opinii naukowców w przeciągu najbliższych 5–10 lat być może uda się taki standard opracować) wartości normatyw higienicznych opartych na relacji „dawka–skutek zdrowotny”, standardy stworzone w oparciu o „filozofię środowiskową” mogą być uznawane za pewnego rodzaju praktyczny substytut i rozsądną alternatywę. Mogą one być z powodzeniem aplikowane dla celów mikrobiologicznej kontroli jakości zarówno powietrza atmosferycznego, jak i środowiska pracy oraz nieprzemysłowego środowiska wewnątrz.

Post scriptum czyli subiektywne spojrzenie na problem normatyw higienicznych

Jak pokazały przytoczone wyżej fakty, historia powstawania i (mniej lub bardziej powszechnego) stosowania standardów dla SCMB opracowanych na bazie pomiarów wolumetrycznych jest wciąż stosunkowo krótka i obejmuje okres ostatniego ćwierćwiecza. Mając możliwość „śledzenia postępu” w tym zakresie, między innymi poprzez uczestnictwo w zespołach eksperckich (Światowej Organizacji Zdrowia, Komisji Europejskiej, Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy) czy panelach dyskusyjnych organizowanych w czasie dużych „branżowych” konferencji (np. Indoor Air), klarownym staje się fakt braku konsensusu wśród badaczy, co do możliwości sformułowania standardów/wartości normatyw dla SCMB opartych na relacji dawka-odpowiedź. Przedstawione w artykule argumenty punktuujące teoretyczne i praktyczne (metodyczne) „braki” w tym zakresie mogą skłaniać wielu badaczy do zaniechania aktywności na tym polu. Czy jednak nauka, będąc opartą o – w pełni słuszne – teoretyczne podstawy, może tak dalece ingerować w warstwę pragmatyczną? Opisane powyżej „podejście środowiskowe” do problemu tworzenia normatyw higienicznych dla SCMB, choć „odważne”, posiada istotny walor praktyczny. Budowa normatyw higienicznych opartych na „filozofii środowiskowej”, a nie „klinicznej/medycznej”, dla większości SCMB ze względu na brak możliwości wyznaczenia ścisłej relacji między dawką szkodliwego czynnika, a skutkiem zdrowotnym wywołanym jego działaniem wydaje się być w chwili obecnej rozsądną alternatywą. Znane przysłowie powiada, że „czas nie jest straconym, jeśli straci się cały czas”. Dziś jednak, gdy dobiega końca pierwsza dekada nowego stulecia, zasadnym staje się pytanie: czy wszystkich nas jest nadal stać na to, by tracić „cały czas”?

Piśmiennictwo

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (Dz.U. 2005, Nr 81, poz. 716 z późn. zm.: Dz.U. 2008, Nr 48, poz. 288).
2. Zyska B.: Zagrożenia Biologiczne w Budynku. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999: 252.
3. EU-OSHA - European Agency for Safety and Health at Work - European Risk Observatory Report: Expert Forecast on Emerging Biological Risks Related to Occupational Safety and Health. Office for Official Publications of the European Communities, Luksemburg 2007: 145.
4. Dyrektywa 2000/54/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady Unii Europejskiej z dnia 18 września 2000 r. w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy. Official J Eur Communities L. 262/21, Bruksela.
5. Dutkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L. i wsp.: Biologiczne Czynniki Zagrożenia Zawodowego. Klasyfikacja, Narażone Grupy Zawodowe, Pomiary, Profilaktyka. Ad punctum, Lublin 2007: 160.
6. Dutkiewicz J., Jabłoński L.: Biologiczne Szkodliwości Zawodowe. PZWL, Warszawa 1989: 316.
7. Macher J. (ed.): Bioaerosols: Assessment and Control. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati 1999: 1-1-26-17.
8. Baron P.A., Willeke K. (ed.): Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. John Wiley and Sons, Inc., New York 2001: 1131.
9. Wlazło A.: Określenie Narażenia Pracowników Bibliotek i Archiwów na Wybrane Szkodliwe Czynniki Biologiczne z Uwzględnieniem Wpływu Systemów Wentylacyjno-Klimatyzacyjnych. Rozprawa doktorska. Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec 2009: 120.
10. Dutkiewicz J., Górny R.L.: Biologiczne czynniki szkodliwe dla zdrowia - klasyfikacja i kryteria oceny narażenia. Med Pr 2002; 53/1: 29-39.
11. Seo S.C., Reponen T., Levin L. i wsp.: Size-fractionated (1→3)-β-D-glucan concentrations aerosolized from different moldy building materials. Sci Total Environ 2009; 407: 806-814.
12. Górny R.L.: Cząstki Grzybów i Bakterii jako Składniki Aerozolu Pomieszczeń: Właściwości, Mechanizmy Emisji, Detekcja. Wydawnictwo Instytutu Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec 2004: 164.
13. Górny R.L.: Biologiczne czynniki szkodliwe: normy, zalecenia i propozycje wartości dopuszczalnych. PiMOŚP 2004; 3/41: 17-39.
14. Brandys R.C., Brandys G.M.: Worldwide Exposure Standards for Mold and Bacteria. 7th Edition. OEHCS, Inc., Publications Division, Hinsdale 2007: 119.
15. Augustyńska D., Pośniak M.: Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy - Czynniki Szkodliwe w Środowisku Pracy - Wartości Dopuszczalne. CIOP-PIB, Warszawa 2007: 38.

Adres do korespondencji:

*Dr hab. n. med. Rafał L. Górny
Pracownia Zagrożeń Biologicznych
Zakład Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut
Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel.: +22 623 46 77
fax +22 623 36 93
e-mail: ragor@ciop.pl*