

# Aktualne techniki oczyszczania powietrza z czynników biologicznych

## Current air purification technologies for biological agents

RAFAŁ LEWANDOWSKI <sup>1/</sup>, PAWEŁ JÓŹWIK <sup>2/</sup>

<sup>1/</sup> Centrum Inżynierii Biomedycznej, Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

<sup>2/</sup> Wydział Nowych Technologii i Chemii, Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

W powietrzu występuje wiele różnych cząstek biologicznych, które nazywa się bioaerozolem. Mogą one być żywe lub martwe i najczęściej mają średnicę w zakresie od 0,001 do 100  $\mu\text{m}$ . Narażenie na bioaerozole może prowadzić do wystąpienia niekorzystnych skutków zdrowotnych u ludzi, takich jak: choroby zakaźne, ostre reakcje toksyczne i choroby alergiczne. Szczególnym niebezpieczeństwem jest możliwość potencjalnego użycia wysoce zakaźnych drobnoustrojów pod postacią bioaerozolu podczas ataku terrorystycznego. Z tych powodów od wielu lat prowadzone są badania, których celem jest opracowanie jak najbardziej skutecznych technik niszczenia drobnoustrojów występujących w powietrzu. Technologie stosowane obecnie w urządzeniach do inaktywacji drobnoustrojów w bioaerozolach oparte są na zmodyfikowanych metodach fizycznych i chemicznych oraz na połączeniu metod filtracyjnych z działaniem bakteriobójczym promieniowania ultrafioletowego, jonizacją powietrza lub użyciem nanocząsteczek.

**Słowa kluczowe:** bioaerozole, techniki oczyszczania powietrza, metody mechaniczne, fizyczne i chemiczne

The air contains a lot of different biological particles called bioaerosol. They may be alive or dead and usually of a diameter between 0.001 and 100  $\mu\text{m}$ . The exposure to bioaerosols can lead to adverse health effects in humans, such as infectious diseases, acute toxic reactions and allergic diseases. A particular danger is posed by the possibility of a potential use of highly infectious microorganisms in the form of bioaerosol during a terrorist attack. Accordingly, a lot of studies aimed at developing the most effective technologies to eradicate airborne microorganisms have been carried out for many years. The techniques currently used for inactivation of bioaerosols are based on modified physical and chemical methods or a combination of filtration methods with ultraviolet radiation, air ionization or nanoparticles.

**Key words:** bioaerosols, air purification technologies, mechanical, physical and chemical methods

© Hygeia Public Health 2017, 52(2): 103-110

www.h-ph.pl

Nadesłano: 26.01.2017

Zakwalifikowano do druku: 10.04.2017

Adres do korespondencji / Address for correspondence

dr n. biol. Rafał Lewandowski  
Centrum Inżynierii Biomedycznej, Instytut Optoelektroniki  
Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie  
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
tel. 261 83 95 39, e-mail: rafal.lewandowski@wat.edu.pl

## Wprowadzenie

Cząstki biologiczne zawieszane w powietrzu nazywamy bioaerozolem. Powietrze jest fazą rozpraszającą, natomiast fazą rozproszoną jest materiał biologiczny zazwyczaj o średnicy 0,001-100  $\mu\text{m}$ , który może zawierać żywe lub martwe komórki drobnoustrojów lub cząstki biologiczne niezdolne do życia [1]. W środowisku naturalnym cząstki biologiczne przenoszone drogą powietrzną rzadko występują pojedynczo i stanowią niewielki odsetek (<0,1%) wszystkich cząsteczek występujących w naturalnych aerozolach. Najczęściej są one przenoszone w postaci skupisk, agregatów lub też jako cząstki związane z pyłem pochodzenia organicznego lub nieorganicznego albo otoczone warstwą wody w postaci kropli [2]. Na

cząstkach pyłu drobnoustroje mogą tworzyć struktury biofilmu – skupiska bakterii otoczone śluzem [3]. Zapewnia to znacznie niższą podatność drobnoustrojów na szkodliwe dla nich czynniki środowiska, takie jak promieniowanie UV lub wysychanie. Wśród cząstek biologicznych występujących w bioaerozolach można wyróżnić bakterie (komórki wegetatywne i endospory), wirusy, grzyby (fragmenty grzybni i zarodniki), pierwotniaki oraz wytwarzane przez nie różne substancje (np. endotoksyny, enterotoksyny, enzymy, mykotoksyny), a także pyłki roślinne [4]. Bakterie występujące w bioaerozolach mają zwykle średnicę w zakresie od 0,5 do 2  $\mu\text{m}$ , natomiast większość spor grzybów pleśniowych ma średnicę większą niż 3  $\mu\text{m}$  [5]. Około 50% cząstek w aerozolach, w skład których

wchodzą komórki drobnoustrojów ma średnicę większą niż 3  $\mu\text{m}$  [6]. Cząstki o średnicy od 1,0 do 5,0  $\mu\text{m}$  zwykle długo pozostają zawieszone w powietrzu i mogą być przenoszone na duże odległości, natomiast cząstki większe szybko osadzają się na różnych powierzchniach [7]. W cząstkach o dużej średnicy aerodynamicznej ( $\geq 5 \mu\text{m}$ ) niektóre bakterie żyją dłużej niż w cząstkach o małej średnicy aerodynamicznej [8]. Ponadto w dużych cząstkach (o średnicy 12  $\mu\text{m}$ ) może znajdować się nawet ponad 2 tys. endospor z rodzaju *Bacillus* lub komórek wegetatywnych bakterii Gram(-), np. *Escherichia coli* [9]. Zjawisko to stwarza duże zagrożenie dla zdrowia populacji, ze względu na znacznie wyższy potencjał zakaźny, przy nawet niewielkiej liczbie takich cząstek wchłoniętych z powietrzem do górnych dróg oddechowych ludzi lub zwierząt.

W wielu pracach wykazano, że ekspozycja na bioaerozole może wywołać niekorzystne skutki zdrowotne, istotne zarówno dla zdrowia publicznego, jak i medycyny pracy. Są to choroby zakaźne, ostre reakcje toksyczne i choroby alergiczne [10]. W przypadku niektórych chorób wywoływanych przez bakterie przenoszone drogą powietrzną, takich jak np. gruźlica czy legionelloza udowodniono, że częstość ich występowania ma ścisły związek z liczbą drobnoustrojów wywołujących te choroby występujących w powietrzu wdychanym przez ludzi [11]. W skrajnych przypadkach, kiedy bioaerozole w środowisku wewnętrznym zawierają dużą liczbę zakaźnych drobnoustrojów (wirusów, bakterii, grzybów), może dojść do wystąpienia ognisk epidemicznych chorób zakaźnych przenoszonych drogą powietrzną. Najliczniej reprezentowaną grupą czynników chorobotwórczych przenoszonych drogą powietrzno-pyłową lub powietrzno-kropelkową są wirusy. Najczęściej są to wirusy wywołujące tzw. chorobę przeziębieniową (rynowirusy, koronawirusy, wirusy grypy i paragrypy, syncytialny wirus oddechowy, enterowirusy i adenowirusy) oraz wirusy powodujące tzw. choroby wysypkowe wieku dziecięcego (np. odrę, ospę wietrzną, różyczkę). Istotnym zagrożeniem dla ludzi jest wirus grypy, który może wywoływać zachorowania o charakterze epidemicznym lub nawet pandemicznym. Wirusy przenoszone drogą powietrzną mogą powodować również choroby zakaźne, szczególnie niebezpieczne, takie jak np. zespół ostrej niewydolności oddechowej (SARS – *Severe Acute Respiratory Syndrom*) oraz niektóre wirusowe gorączki krwotoczne (np. Lassa, Marburg, Ebola). Szczególną sytuacją jest niebezpieczeństwo użycia wysoce zakaźnych czynników biologicznych przenoszonych drogą powietrzną podczas ataku bioterrorystycznego [12]. Drobnoustroje, takie jak bakterie Gram(+) z rodzaju *Bacillus* i *Clostridium*, w skomplikowanym i wieloetapowym procesie wytwarzają endospory –

przetworniki umożliwiające im wieloletnie przeżycie w niekorzystnych warunkach środowiska. Endospory są szczególnie odporne na stres związany z aerozolizacją, stąd ta postać morfologiczna chorobotwórczych laseczek *Bacillus anthracis* została uznana za bardzo niebezpieczny czynnik biologiczny, który może zostać wykorzystany w potencjalnych działaniach bioterrorystycznych lub też w wojnie biologicznej. Endospory laseczki *Bacillus anthracis* zostały użyte w ataku bioterrorystycznym w Stanach Zjednoczonych w 2001 r. [13]. Zakażeniu tym drobnoustrojem uległy wówczas 22 osoby, spośród których zmarło 5 chorych. Atak ten skutkowałam też znacznymi stratami ekonomicznymi oraz koniecznością wieloletniej dekontaminacji budynków użyteczności publicznej. Świadomość tych zagrożeń spowodowała, że na całym świecie, a zwłaszcza w krajach wysokorozwiniętych, podejmowane są różne działania zapobiegawcze w tym zakresie, polegające na ciągłym podnoszeniu jakości mikrobiologicznej powietrza w środowiskach zamkniętych poprzez stosowanie coraz nowocześniejszych systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, a także poprzez stosowanie różnych metod monitorowania czystości mikrobiologicznej powietrza w tych miejscach.

### Obecnie stosowane wybrane techniki oczyszczania powietrza z czynników biologicznych

Bioaerozole występują praktycznie wszędzie, zarówno w środowisku zewnętrznym, jak i w różnych przestrzeniach zamkniętych, tzw. środowiskach wewnętrznych (np. w pomieszczeniach mieszkalnych, na stanowiskach pracy, w pojazdach itp.) [14]. Powietrze wewnętrzne w większości zawiera zanieczyszczenia chemiczne oraz ok. 5-34% zanieczyszczeń pochodzenia biologicznego [15]. Znaczne ograniczenie liczby żywych cząstek biologicznych występujących w bioaerozolach lub całkowite ich wyeliminowanie z powietrza wewnętrznego w określonym środowisku jest możliwe dzięki zastosowaniu odpowiedniej dla danego rodzaju czynnika metody oczyszczania powietrza.

Obecnie w tym celu wykorzystywanych jest wiele metod, które mogą prowadzić do dezynfekcji lub sterylizacji powietrza wewnętrznego. Metody te dzielimy na: mechaniczne, fizyczne i chemiczne. Klasyczne metody mechaniczne oparte są tylko na wychwytywaniu czynników biologicznych zawieszonych w powietrzu za pomocą różnego rodzaju filtrów. Czynniki te nie są jednak niszczone. Natomiast metody fizyczne i chemiczne prowadzą do całkowitej lub częściowej inaktywacji tych czynników. Do niedawna zasada działania większości urządzeń przeznaczonych do niszczenia czynników biologicznych występujących w bioaerozolach oparta była tylko na jednej z metod inaktywacji. W ostatnich latach pojawiły się również bardziej zło-

żone urządzenia, których zasada działania oparta jest na równoczesnym zastosowaniu metody filtracyjnej i jednej z metod inaktywacji lub na dwóch różnych metodach inaktywacji czynników biologicznych.

### Metody mechaniczne

Metody mechaniczne oparte na różnych technikach filtracyjnych są nadal powszechnie stosowane w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, zarówno w pomieszczeniach mieszkalnych, jak i w różnych budynkach użyteczności publicznej, halach przemysłowych oraz środkach transportu. Obecnie wytwarzane są filtry wykonane z nowoczesnych materiałów filtracyjnych o bardzo wysokiej wydajności i skuteczności zatrzymywania cząstek biologicznych. Przykładem są urządzenia filtracyjne zawierające 2-stopniowe filtry włókninowe o dużej skuteczności – HEPA (*High Efficiency Particulate Air*), które zatrzymują 99,97% cząstek o średnicy  $\geq 0,3 \mu\text{m}$  oraz filtry ULPA (*Ultra Low Particulate Air*), które zatrzymują 99,99% o średnicy  $\geq 0,12 \mu\text{m}$ . Jednak wadą metod filtracyjnych jest konieczność stosunkowo częstej wymiany wkładów filtracyjnych, ponieważ żywe drobnoustroje, które zostaną zatrzymane na powierzchni lub wewnątrz materiału filtracyjnego bardzo często namnażają się w nim, w wyniku czego spada skuteczność filtra, pojawia się nieprzyjemny zapach oraz, co najważniejsze, filtr taki staje się bardzo dużym zagrożeniem dla osób serwisujących urządzenia filtracyjne. W ciągu ostatnich 10 lat pojawiło się wiele prac, w których materiały filtracyjne próbowano nasączać lub pokrywać różnymi substancjami o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych. Celem było wydłużenie sprawności filtrów i zwiększenie bezpieczeństwa dla pracowników konserwujących układy wentylacyjne. Filtry nasączano roztworami jodyny oraz enzymami niszczącymi błony komórkowe [16, 17]. Takie postępowanie nie było jednak wystarczająco efektywne, ponieważ warstwa kurzu na powierzchni filtra znacząco zmniejszała aktywność substancji przeciwdrobnoustrojowych. Kolejną modyfikacją było zastosowanie preparatów bakteriobójczych zawierających cząsteczki nanosrebra do niszczenia bakterii zawartych w zużytych filtrach [18, 19]. W filtrach poddanych działaniu nanosrebra w ciągu 9 min uzyskiwano zniszczenie powyżej 99% komórek roślinnych bakterii z gatunków *Staphylococcus epidermidis*, *Escherichia coli* i *Bacillus subtilis* [18]. Natomiast Rengasamy i wsp. [20] wykazali, że przeżycie bakteriofagów MS2 po 4 godz. od chwili ich osadzenia na powierzchni filtrów pokrytych żywicą zawierającą jodynę, cząsteczkami srebra i miedzi lub tlenkiem tytanu (przy wilgotności względnej powietrza wynoszącej 80% i temp. otoczenia 37°C) wynosiło odpowiednio 1, 4 i 8%. Bakteriofagi MS2 używane są w badaniach doświadczalnych,

jako symulanty (czynniki zastępcze) wirusów RNA wywołujących u ludzi niektóre choroby zakaźne szczególnie niebezpieczne (np. wirusowe gorączki krwotoczne Marburg i Ebola). Innym sposobem poprawy wydajności i bezpieczeństwa metody filtracyjnej była ekspozycja filtrów na działanie ozonu, w wyniku czego uzyskiwano intensywną koagulację drobnych cząstek pyłu osiadłych na powierzchni filtrów oraz inaktywację zawartych w nich szkodliwych czynników biologicznych i chemicznych [21, 22].

### Metody fizyczne

Wśród fizycznych metod inaktywacji bioaerozoli, obecnie najczęściej badań związanych jest z metodami termicznymi. Od czasu, gdy Ludwik Pasteur po raz pierwszy użył energii cieplnej do niszczenia drobnoustrojów, zastosowanie termicznych metod dezynfekcji i sterylizacji ograniczało się głównie do inaktywacji drobnoustrojów w płynach lub na powierzchniach różnych materiałów. Całkowite zabicie drobnoustrojów roślinnych występujących w roztworach wodnych osiągane jest pod wpływem wilgotnego ciepła o temp. 121°C w ciągu 15 min. Natomiast zabicie tych samych form drobnoustrojów występujących w niskich stężeniach, w określonej objętości powietrza wewnętrznego (wypełniającego zamknięte przestrzenie), o niskiej wilgotności, można uzyskać dopiero w temp. powyżej 200°C [23]. Zasadniczy mechanizm uszkodzenia większości drobnoustrojów pod wpływem ekspozycji na bardzo wysoką temperaturę jest dobrze poznany i polega przede wszystkim na denaturacji białek [24]. Efektywność tego mechanizmu zależy od poziomu wilgotności, czasu bezpośredniego oddziaływania wysokiej temperatury na czynniki biologiczne, specyfiki budowy drobnoustrojów (zwłaszcza ich składu chemicznego) oraz od rodzaju źródła wytwarzającego ciepło podczas procesu.

Przez wiele lat wykorzystanie metod termicznych do inaktywacji drobnoustrojów w bioaerozolach nie było popularne, ponieważ większość opracowywanych technologii wymagała użycia bardzo dużych ilości energii. Ponadto technologie dezynfekcji i sterylizacji oparte na konwencjonalnych metodach termicznych, w większości przypadków umożliwiają podczas procesów stosowanie maksymalnej temperatury wynoszącej ok. 150°C, a czas ich trwania wynosi od kilkunastu minut do nawet kilku godzin, co znacząco zmniejsza ich wydajność, zwłaszcza w przypadku urządzeń przeznaczonych do oczyszczania powietrza [25]. Ponadto podczas tego typu procesów termicznej sterylizacji, nie jest możliwe zniszczenie dużej liczby endospor bakteriarynych w bioaerozolach w krótkim czasie, ponieważ te formy drobnoustrojów są najbardziej odporne na działanie różnych czynników fizycznych lub chemicznych spośród wszystkich drobnoustrojów [26].

Dlatego w ostatnich latach pojawiły się prace opisujące nowe rozwiązania technologiczne w zakresie termicznych metod sterylizacji powietrza, w których podczas procesów osiągane są temperatury wynoszące powyżej 200°C, a czas oddziaływania energii cieplnej na czynniki biologiczne poddane jej działaniu wynosi poniżej sekundy [27]. Takie rozwiązania wykazują wysoką sprawność i skuteczność, a ponadto są energooszczędne. Jednym z takich rozwiązań jest termiczna inaktywacja bioaerozoli przy użyciu urządzeń, których konstrukcja oparta jest na specjalnych zwojach elektrycznych wytwarzających wysoką temperaturę. Główną zaletą tych urządzeń jest łatwa ich instalacja w już istniejących systemach oczyszczania powietrza w budynkach oraz mała ilość wytwarzanych produktów ubocznych. Zostało to potwierdzone w badaniach doświadczalnych wykonanych przez kilka uznanych zespołów badawczych na świecie [14, 23, 27]. Urządzenia te okazały się najbardziej skuteczne do inaktywacji wirusów występujących w bioaerozolach. Grinshpun i wsp. [28] wykazali, że w temp. ok. 250°C, przy prędkości przepływu bioaerozolu wynoszącej 36 l/min, w czasie od 0,1 do 1 s ulega zabicciu 99,99% bakteriofagów MS2. Ponadto w urządzeniach tego typu, przy czasie ekspozycji wynoszącym poniżej 0,3 s, uzyskano zabicie 99,9% wegetatywnych komórek bakterii w temp. 160 lub 360°C, odpowiednio gatunków *Escherichia coli* lub *Bacillus subtilis* [27]. Wykazano również, że użycie wysokiej temperatury wynoszącej 350 lub 400°C w czasie 0,2 s spowodowało zniszczenie więcej niż 99% przetrwalników (spor) grzybów, odpowiednio z gatunków *Aspergillus versicolor* lub *Cladosporium cladosporioides* [29]. Proces ten powodował również zmniejszenie stężeń (1→3)-β-D-glukanu – czynnika występującego w bioaerozolach zawierających przetrwalniki grzybów, który wywołuje silną odpowiedź zapalną u ludzi. Jednak w opisanych badaniach osiągnęto poziom inaktywacji czynników biologicznych nie większy niż 4 log oraz podawano tylko ogólną temperaturę w komorze urządzenia, przez którą przepuszczano bioaerozol, bez dokładnego podania rozkładu temperatury w urządzeniu oraz innych fizycznych parametrów procesu.

Badania z użyciem termicznej inaktywacji bioaerozoli w bardzo krótkim czasie były wykorzystywane również podczas opracowywania skutecznych technik obrony przed atakami bioterrorystycznymi, w których niebezpieczne czynniki biologiczne przenoszone są drogą powietrzną. Jednak w porównaniu z badaniami opisanymi wcześniej, które były ukierunkowane głównie na poprawienie czystości mikrobiologicznej powietrza w różnych pomieszczeniach użytkowych, w badaniach na potencjalnych czynnikach ataku biologicznego wymagane jest osiągnięcie jak największej skuteczności – większego zmniejszenia liczby niszczonej

czonych drobnoustrojów. Na przykład w badaniach z użyciem przepływowego, elektrycznego urządzenia grzewczego uzyskano przy temperaturze procesu wynoszącej ok. 400°C zabicie 99,999% endospor *Bacillus subtilis* var. *niger* (nazywanego również *Bacillus globigii* – BG) występujących w bioaerozolu [23, 30].

W ostatnich latach pojawiły się również technologie, w których do dezynfekcji powietrza wykorzystuje się energię cieplną uzyskaną podczas reakcji egzotermicznych głównie glinu z pięciotlenkiem jodiny lub glinu z tlenkiem srebra [31, 32]. W urządzeniach tego typu niszczenie drobnoustrojów następuje pod wpływem, nie tylko wysokiej temperatury, ale dodatkowo jest wspomagane działaniem gazu uwalnianego podczas reakcji, który przyspiesza inaktywację nawet endospor bakteryjnych. Wykazano, że w ciągu kilkudziesięciu milisekund w urządzeniach wykorzystujących reakcję glinu z pięciotlenkiem jodiny przy temperaturze reakcji wynoszącej 360°C uzyskuje się zniszczenie ok. 80% endospor *Bacillus thuringensis*. Dla porównania, gdy w tych samych badaniach stosowano urządzenie oparte tylko na działaniu wysokiej temperatury, ten sam efekt osiągnęto dopiero przy temperaturze wynoszącej ok. 1000°C [33].

Jednak najważniejszą zaletą urządzeń opartych na milisekundowych impulsach termicznych, oprócz wysokiej skuteczności, jest ich wysoka sprawność przy relatywnie niskim zapotrzebowaniu energetycznym [34]. Ponadto większa skuteczność sporobójcza tych urządzeń, w porównaniu z konwencjonalnymi urządzeniami do sterylizacji termicznej, związana jest również prawdopodobnie z pojawieniem się nowego mechanizmu zabijania spor. Polega on na występowaniu zwiększonej liczby mutacji w genach odpowiedzialnych za prawidłową budowę endospor, które warunkują ich oporność na czynniki chemiczne i fizyczne, w tym również na wysoką temperaturę [35].

Metody inaktywacji bioaerozoli oparte na jonizacji powietrza są, podobnie jak metody termiczne, również bardzo rozpowszechnione, ponieważ wykazują wysoką skuteczność wiruso-, bakterio- i grzybobójczą oraz są stosunkowo tanie w eksploatacji [36]. Jedną z najnowszych modyfikacji tej metody jest technika MFI (*Multifunction Ion Air Cleaning*), w której wykorzystano współdziałanie procesów jonizacji i przyciągania elektrostatycznego cząstek o średnicy >0,003 μm. Urządzenia działające w oparciu o tą technikę o wydajności 250 m<sup>3</sup>/h umożliwiają usunięcie drobnoustrojów z powietrza na poziomie ≤1 CFU/m<sup>3</sup> [37]. Ponadto urządzenia te mogą współpracować z różnymi systemami wentylacyjnymi i klimatyzacyjnymi. Jednak częste stosowanie metod polegających na wytwarzaniu zjonizowanego powietrza może być szkodliwe dla ludzi, ponieważ wytwarzane są nadmierne ilości ozonu i szkodliwych ładunków elektrycznych [21].

Kolejną często stosowaną fizyczną metodą inaktywacji bioaerozoli bakteryjnych jest napromieniowywanie powietrza promieniowaniem UV (UVGI – *Ultraviolet Germicidal Irradiation*) [38]. W wielu badaniach dotyczących tej metody określono, w jaki sposób różne parametry fizyczne, takie jak wielkość dawki napromieniowania, czas ekspozycji, rodzaj ruchu powietrza oraz wilgotność otoczenia mają wpływ na skuteczność tej metody [39]. Metoda UVGI jest stosunkowo łatwa w stosowaniu i nie zużywa dużo energii. Ponadto zastosowanie promieniowania UV o długości fali 254 nm, w skutecznych dawkach napromieniowania ustalonych dla poszczególnych gatunków drobnoustrojów, umożliwia ich zniszczenie w 99%, zarówno w powietrzu, jak i na powierzchniach [40]. W badaniach oceniających skuteczność inaktywacji wirusów przenoszonych drogą powietrzną za pomocą UVGI wykazano, że dawka promieniowania umożliwiająca zabicie 99% wirusów zbudowanych z dwuniciowego kwasu nukleinowego (RNA lub DNA) jest w przybliżeniu 2-krotnie wyższa niż dla wirusów zbudowanych z jednej nici kwasu nukleinowego [41]. Ponadto skuteczność wirusobójcza tej samej dawki UVGI maleje wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza. Metoda UVGI w ostatnich latach została wykorzystana również w urządzeniach inaktywujących bioaerozole metodą fotokatalityczną. W metodzie tej w wyniku działania promieniowania UV na tlenek tytanu, tworzone są nadtlenek wodoru oraz rodniki wodorotlenowe. Substancje te mają silne właściwości utleniające, a ponadto wykazują działanie synergistyczne. Rozkładają substancje wydzielające nieprzyjemne zapachy na bezzapachowy dwutlenek węgla i wodę oraz niszczą drobnoustroje [42]. W badaniach doświadczalnych z użyciem bioaerozoli zawierających bakterie lub grzyby, po zastosowaniu procesu fotokatalitycznego w czasie od 30 do 480 min. uzyskano maksymalną redukcję liczby hodowlanych bakterii i grzybów wynoszącą odpowiednio 84 i 74% [43]. Jednak wadą zarówno metody UVGI, jak i metody fotokatalitycznej, jest wytwarzanie ozonu i wolnych rodników w stosunkowo wysokich stężeniach, co wywołuje szkodliwe skutki zdrowotne u ludzi, natomiast wielokrotne bezpośrednie narażenie na promieniowanie UV może prowadzić również do uszkodzeń skóry i oczu [38, 44].

W ostatnich latach opracowywane są również nowoczesne techniki oczyszczania powietrza oparte na innych metodach fizycznych, niż dotychczas stosowane. Należy do nich m.in. metoda sterylizacji mikrofalowej (MOS – *Microwave Oxidation System*), która polega na wykorzystaniu promieniowania mikrofalowego oraz specjalnych rodzajów ceramiki do nagrzewania gazów lub bioaerozoli, co prowadzi do bardzo szybkiego i wysoce efektywnego utleniania

zanieczyszczeń organicznych w gazach [45]. Ten nowy sposób ‘dopalania’ zanieczyszczeń w gazach polega na wprowadzaniu zanieczyszczonych gazów do metalowej komory, której ściany są wyłożone ceramicznymi kulkami, nagrzewanymi za pomocą mikrofal do temperatury w zakresie 1000-1300°C. Skuteczne nagrzewanie kulek ceramicznych osiągane jest dzięki zastosowaniu specjalnego rodzaju materiału ceramicznego, charakteryzującego się dużą odpornością na wysokie temperatury i jednocześnie bardzo dobrze pochłaniającego mikrofałę o częstotliwości w zakresie 0,5-4 GHz. Materiał ceramiczny pokrywający ściany reaktora charakteryzuje się ponadto bardzo małą tłumiennością energii mikrofalowej – nawet w bardzo wysokich temperaturach wynoszących powyżej 1000°C. Dla usprawnienia procesu utleniania do komory wprowadzane jest dodatkowo powietrze lub tlen. Drobnoustroje zawarte w bioaerozolu przepływając pomiędzy ceramicznymi kształtkami nagrzwanymi za pomocą mikrofal są bardzo szybko niszczone. Podejmowane były również próby konstruowania urządzeń do inaktywacji bioaerozoli, opartych na działaniu promieniowania mikrofalowego, w których niszczenie drobnoustrojów odbywało się bez wytwarzania wysokich temperatur. Urządzenia te wykazywały jednak niższą skuteczność biobójczą niż urządzenia oparte na energii termicznej. Wu i wsp. [46] wykonali badania z użyciem takiego typu urządzenia i wykazali, że w wyniku działania na wybrane drobnoustroje promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2450 MHz i mocy 700 W przez 1,5 min. przeżywało 35% endospor *Bacillus globigii* oraz 5,8% komórek wegetatywnych *Pseudomonas fluorescens*. Ci sami autorzy wykonali również podobne badania, w których ocenili skuteczność użycia promieniowania mikrofalowego do inaktywacji bioaerozoli zawierających bakteriofagi MS2. Stwierdzili, że przy ekspozycji na mikrofałę o mocy 700 W przez 2 min ulegało zniszczeniu ok. 90% tych wirusów [47]. Natomiast Heimbuch i wsp. [48] opracowali urządzenie do inaktywacji bioaerozoli, w którym działanie mikrofal połączono z wytwarzaniem pary wodnej. Zastosowanie tego urządzenia w badaniach z użyciem materiałów filtracyjnych masek twarzowych zanieczyszczonych wirusami grypy A H1N1, poddawanych działaniu promieniowania mikrofalowego o mocy 1250 W przez 2 min, umożliwiło redukcję liczby wirusów o 5 log.

Do nowoczesnych, fizycznych metod inaktywacji drobnoustrojów w bioaerozolach, zalicza się również metodę oczyszczania powietrza z zastosowaniem zimnej plazmy generowanej w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Jest ona stosowana w postaci tzw. filtrów plazmowych, na których zatrzymywanych jest ponad 80% cząstek stałych (w tym również czynników biologicznych) o średnicy od 0,001 do 100 µm.

Podczas procesu następuje jonizacja powietrza i powstaje ozon, który ma właściwości przeciwdrobnoustrojowe [49]. Głównymi zaletami tej metody jest łatwość generowania strumienia plazmy z wykorzystaniem różnych źródeł, niewielki koszt aparatury i jej montażu w różnych warunkach użycia oraz niskie koszty eksploatacyjne. W badaniach doświadczalnych wykonanych przez Shimzu i wsp. [50] z użyciem prototypowego urządzenia do dekontaminacji powietrza uzyskano 100% zabicie wegetatywnych komórek bakterii *Bacillus subtilis var. niger* oraz *Escherichia coli* występujących w postaci bioaerozoli, które były poddawane działaniu zimnej plazmy wytwarzanej przy napięciu wyładowania wynoszącym 1,4 kV. W innych badaniach doświadczalnych wykazano, że w wyniku działania plazmy na bioaerozole zawierające drobnoustroje *Pseudomonas fluorescens* lub *Bacillus subtilis var. niger* przez 0,12 s uzyskano przeżycie odpowiednio 0 i 1,6% bakterii [51].

### Metody chemiczne

Od wielu lat do dekontaminacji powietrza i powierzchni w przestrzeniach zamkniętych stosuje się różne środki chemiczne w postaci aerozoli i gazów. Jednak większość z tych środków ma silne właściwości toksyczne (np. formaldehyd, tlenek etylenu), dlatego ich stosowanie jest obecnie ograniczone tylko do koniecznych sytuacji i wymaga zachowania szczególnych środków ostrożności. W ostatnich latach obserwuje się również rozwój bezpiecznych, chemicznych metod inaktywacji drobnoustrojów zawieszonych w powietrzu. Bezpieczne i skuteczne stosowanie tych technik zwykle wymaga jednak posiadania specjalistycznych i kosztownych urządzeń, które powinny być obsługiwane tylko przez doświadczony i przeszkolony personel. Jedną z takich nowoczesnych technik jest wykorzystanie gazowej postaci nadtlenu wodoru (*Vaporized Hydrogen Peroxide* – VHP) jako środka sterylizującego [52, 53]. W warunkach temperatury pokojowej (25°C) i normalnego ciśnienia atmosferycznego (101,35 kPa) nadtlenek wodoru występuje w postaci ciekłej i w stężeniach wynoszących 10-30% ma właściwości przeciwbakteryjne. Jednak ciekły nadtlenek wodoru w postaci stężonej jest związkiem niestabilnym, który ma właściwości wybuchowe i samozapłonowe oraz powoduje korozję materiałów [54]. W przeciwieństwie do ciekłej formy nadtlenu wodoru, postać gazowa wykazuje wyższą aktywność sporobójczą – przy znacznie niższych stężeniach, niż w przypadku postaci ciekłej (ok. 0,1 mg/l) [55]. Dlatego opracowano automatyczne systemy wykorzystujące gazowy nadtlenek wodoru do sterylizacji

różnego rodzaju przestrzeni zamkniętych [52]. VHP powstaje w wyniku waporyzacji ciekłego nadtlenu wodoru w temp. 120°C, a jego stężenie utrzymywane jest poniżej punktu kondensacji, którego wartość zależy od temperatury otoczenia. Podczas sterylizacji przestrzeni zamkniętych (np. pomieszczeń), stężenie VHP utrzymywane jest zwykle znacznie poniżej poziomu nasycenia (0,1-1,5 mg/l w temp. 25°C). Metoda sterylizacji z użyciem VHP jest procesem ‘suchym’, w którym stężenie substancji czynnej jest znacznie niższe niż w przypadku metod opartych na cieczach utleniających (np. na kwasie nadoctowym). Metoda VHP wykazuje dużą skuteczność bakteriobójczą, wirusobójczą, grzybobójczą i sporobójczą [55, 56]. Bardzo ważną zaletą metody VHP, jest brak szkodliwości stosowanego związku chemicznego dla środowiska oraz niski stopień szkodliwości dla ludzi. Układy VHP działają w warunkach ciśnienia atmosferycznego i umożliwiają szybką, niskotemperaturową sterylizację skażonych przestrzeni zamkniętych. Systemy te wykorzystywane są powszechnie do niszczenia drobnoustrojów zawieszonych w powietrzu oraz znajdujących się na różnych powierzchniach. Znajdują zastosowanie m.in. w placówkach służby zdrowia, laboratoriach diagnostycznych i badawczych, zakładach farmaceutycznych, zwierzętarniach itp.

### Podsumowanie

Nowoczesne techniki oczyszczania powietrza są coraz bardziej skuteczne i wydajne. Jednak nie wszystkie z nich charakteryzują się energooszczędnością oraz brakiem niekorzystnego oddziaływania na ludzi i środowisko. Obecnie do inaktywacji bioaerozoli stosuje się nowoczesne techniki oparte na zmodyfikowanych metodach fizycznych i chemicznych, a także techniki, w których efektywność metod filtracyjnych zwiększa się działaniem bakteriobójczym promieniowania ultrafioletowego, jonizacją powietrza lub użyciem nanocząsteczek. Dużym problemem pozostaje nadal osiągnięcie dużej wydajności konstruowanych urządzeń, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej skuteczności sporobójczej. Opracowanie urządzeń spełniających takie wymagania jest konieczne ze względu na potencjalne niebezpieczeństwo użycia wysoce zakaźnych czynników biologicznych przenoszonych drogą powietrzną podczas ataku terrorystycznego.

*Praca naukowa finansowana w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju nr 246 201.*

## Piśmiennictwo / References

1. Mandal J, Brandl H. Bioaerosols in indoor environment – a review with special reference to residential and occupational locations. *Open Environ Biol Monit J* 2011, 4(1): 83-96.
2. Fröhlich-Nowoisky J, Kampf CJ, Weber B, et al. Bioaerosols in the earth system: climate, health, and ecosystem interactions. *Atmos Res* 2016, 182: 346-376.
3. Alimowa A, Roberts M, Katz A, et al. Effects of smectite clay on biofilm formation by microorganisms. *Biofilms* 2007, 3(1): 47-54.
4. Després VR, Huffman JA, Burrows SM, et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B* 2012, 64: 15598.
5. Liu F, Lai S, Reinmuth-Selzle K, et al. Metaproteomic analysis of atmospheric aerosol samples. *Anal Bioanal Chem* 2016, 408(23): 6337-6348
6. Jones AM, Harrison RM. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations – a review. *Sci Total Environ* 2004, 326(1-3): 151-180.
7. Cabral JP. Can we use indoor fungi as bioindicators of indoor air quality? Historical perspectives and open questions. *Sci Total Environ* 2010, 408(20): 4285-4295.
8. Blatny JM, Ho J, Skogan G, et al. Airborne Legionella bacteria from pulp waste treatment plant: aerosol particles characterized as aggregates and their potential hazard. *Aerobiologia* 2011, 27(2): 147-162.
9. Thomas RJ, Webber D, Sellors W, et al. Characterization and deposition of respirable large- and small-particle bioaerosols. *App Environ Microbiol* 2008, 74(20): 6437-6443.
10. Liu KFR, Yeh K, Hung MJ, et al. Health risk analysis of indoor air pollution. *Inter J Environ Sci Dev* 2015, 6(6): 464-468.
11. Jones RM, Su YM. Dose-response models for selected respiratory infectious agents: Bordetella pertussis, group A Streptococcus, Rhinovirus and Respiratory Syncytial Virus. *BMC Infect Dis* 2015, 15: 90.
12. Toth DJA, Gundlapalli AV, Schell WA, et al. Quantitative models of the dose-response and time course of inhalational anthrax in humans. *PLoS Pathog* 2013, 9(8): e1003555.
13. Ellis R. Creating a secure network: the 2001 anthrax attacks and the transformation of postal security. *Sociol Rev* 2014, 62: 161-182.
14. Lee T, Grinshpun SA, Martuzevicius D, et al. Relationship between indoor and outdoor bioaerosols collected with a button inhalable aerosol sampler in urban homes. *Indoor Air* 2006, 16(1): 37-47.
15. Prussin AJ 2nd, Marr LC. Sources of airborne microorganisms in the built environment. *Microbiome* 2015, 3: 78.
16. Lee JH, Wu CY, Wysocki KM, et al. Efficacy of iodine-treated biocidal filter media against bacterial spore aerosols. *J Appl Microbiol* 2008, 105(5): 1318-1326.
17. Eninger RM, Adhikari A, Reponen T, Grinshpun SA. Differentiating between physical and viable penetrations when challenging respirator filters with bioaerosols. *Clean* 2008, 36(7): 615-621.
18. Lee BU, Yun SH, Ji JH, Bae GN. Inactivation of *S. epidermidis*, *B. Subtilis*, and *E. coli* bacteria bioaerosols deposited on a filter utilizing airborne silver nanoparticles. *J Microbiol Biotechnol* 2008, 18(1): 176-182.
19. Lee BU, Yun SH, Jung JH, Bae GN. Effect of relative humidity and variation of particle number size distribution on the inactivation effectiveness of airborne silver nanoparticles against bacteria bioaerosols deposited on a filter. *J Aerosol Sci* 2010, 41(5): 447-456.
20. Rengasamy S, Fisher E, Shaffer RE. Evaluation of the survivability of MS2 viral aerosols deposited on filtering face piece respirator samples incorporating antimicrobial technologies. *Am J Infect Control* 2010, 38(1): 9-17.
21. Huang R, Agranovski I, Pyankov O, Grinshpun S. Removal of viable bioaerosol particles with a low-efficiency HVAC filter enhanced by continuous emission of unipolar air ions. *Indoor Air* 2008, 18(2): 106-112.
22. Park JH, Yoon KY, Kim YS, et al. Removal of submicron aerosol particles and bioaerosols using carbon fiber ionizer assisted fibrous medium filter media. *J Mech Sci Technol* 2009, 23(7): 1846-1851.
23. Grinshpun SA, Adhikari A, Li C, et al. Thermal inactivation of airborne viable *Bacillus subtilis* spores by short-term exposure in axially heated air flow. *J Aerosol Sci* 2010, 41(4): 352-363.
24. Coleman WH, Chen D, Li YQ, et al. How moist heat kills spores of *Bacillus subtilis*. *J Bacteriol* 2007, 189(23): 8458-8466.
25. Coleman WH, Setlow P. Analysis of damage due to moist heat treatment of spores of *Bacillus subtilis*. *J Appl Microbiol* 2009, 106(5): 1600-1607.
26. Iciek J, Papiewska A, Molska M. Inactivation of *Bacillus stearothermophilus* spores during thermal processing. *J Food Eng* 2006, 77(3): 406-410.
27. Jung JH, Lee JE, Kim SS. Thermal effects on bacterial bioaerosols in continuous air flow. *Sci Total Environ* 2009, 407(16): 4723-4730.
28. Grinshpun SA, Adhikari A, Li C, et al. Inactivation of aerosolized viruses in continuous air flow with axial heating. *Aerosol Sci Technol* 2010, 44(11): 1042-1048.
29. Jung JH, Lee JE, Lee CH, et al. Treatment of fungal bioaerosols by a high-temperature, short-time process in a continuous-flow system. *Appl Environ Microbiol* 2009, 75(9): 2742-2749.
30. Grinshpun SA, Li C, Adhikari A, et al. Method for studying survival of airborne viable microorganisms in combustion environments: development and evaluation. *Aerosol Air Qual Res* 2010, 10(5): 414-424.
31. Clark BR, Pantoya ML. The aluminium and iodine pentoxide reaction for the destruction of spore forming bacteria. *Phys Chem Chem Phys* 2010, 12(39): 12653-12657.
32. Feng J, Jian G, Liu Q, Zachariah MR. Passivated iodine pentoxide oxidizer for potential biocidal nanoenergetic applications. *ACS Appl Mater Interfaces* 2013, 5(18): 8875-8880.
33. Mulamba O, Hunt EM, Pantoya ML. Neutralizing bacterial spores using halogenated energetic reactions. *Biotechnol Bioproc E* 2013, 18(5): 918-925.
34. Zhou W, Orr MW, Jian G, et al. Inactivation of bacterial spores subjected to sub-second thermal stress. *Chem Eng J* 2015, 279: 578-588.

35. Johansson E, Adhikari A, Reponen T, et al. Association between increased DNA mutational frequency and thermal inactivation of aerosolized *Bacillus* spores exposed to dry heat. *Aerosol Sci Technol* 2011, 45(3): 376-381.
36. Kim YS, Yoon KY, Park JH, Hwang J. Application of air ions for bacterial decolonization in air filters contaminated by aerosolized bacteria. *Sci Total Environ* 2011, 409(4): 748-755.
37. Kałużny J, Muszyński Z, Kałużny BJ. Okulistyczna sala operacyjna – możliwości ograniczenia zanieczyszczeń i zakażeń. Cz. I. Dekontaminacja bioaerozolu powietrza. *Klin Oczna* 2008, 110(1-3): 102-107.
38. Nardell EA, Bucher SJ, Brickner PW, et al. Safety of upper-room ultraviolet germicidal air disinfection for room occupants: results from the tuberculosis ultraviolet shelter study. *Public Health Rep* 2008, 123(1): 52-60.
39. Reed NG. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Rep* 2010, 125(1): 15-27.
40. Kesavan J, Schepers D, Bottiger J, Edmonds J. UV-C decontamination of aerosolized and surface-bound single spores and bioclusters. *Aerosol Sci Technol* 2014, 48(4): 450-457.
41. Tseng CC, Li CS. Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Sci Technol* 2005, 39(12): 1136-1142.
42. Foster HA, Ditta IB, Varghese S, Steele A. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl Microbiol Biotechnol* 2011, 90(6): 1847-1868.
43. Chuaybamroong P, Thunyasirinon C, Supothina S, et al. Performance of photocatalytic lamps on reduction of culturable airborne microorganism concentration. *Chemosphere* 2011, 83(5): 730-735.
44. Hwang GB, Jung JH, Jeong TG, Lee BU. Effect of hybrid UV-thermal energy stimuli on inactivation of *S. epidermidis* and *B. subtilis* bacterial bioaerosols. *Sci Total Environ* 2010, 408(23): 5903-5909.
45. Iordache D, Niculae D. Microwave thermal oxidation of gas emissions resulting from the risky medical waste incineration. *UPB Sci Bull Ser C* 2012, 74(4): 169-180.
46. Wu Y, Yao M. Inactivation of bacteria and fungus aerosols using microwave irradiation. *J Aerosol Sci* 2010, 41(7): 682-693.
47. Wu Y, Yao M. In situ airborne virus inactivation by microwave irradiation. *Chinese Sci Bull* 2014, 59(13): 1438-1445.
48. Heimbuch BK, Wallace WH, Kinney K, et al. A pandemic influenza preparedness study: use of energetic methods to decontaminate filtering facepiece respirators contaminated with H1N1 aerosols and droplets. *Am J Infect Control* 2011, 39(1): e1-e9.
49. Vaze ND, Gallagher MJ, Park S, et al. Inactivation of bacteria in flight by direct exposure to nonthermal plasma. *IEEE T Plasma Sci*, 2010, 38(11): 3234-3240.
50. Shimizu K, Komuro Y, Tatematsu S, Blajan M. Study of sterilization and disinfection in room air by using atmospheric microplasma. *Pharm Anal Acta* 2011, S1: 001.
51. Liang Y, Wu Y, Sun K, et al. Rapid inactivation of biological species in the air using atmospheric pressure nonthermal plasma. *Environ Sci Technol* 2012, 46(6): 3360-3368.
52. Davies A, Pottage T, Bennett A, Walker J. Gaseous and air decontamination technologies for *Clostridium difficile* in the healthcare environment. *J Hosp Infect* 2011, 77(3): 199-203.
53. Linley E, Denyer SP, McDonnell G, et al. Use of hydrogen peroxide as a biocide: new consideration of its mechanisms of biocidal action. *J Antimicrob Chemother* 2012, 67(7): 1589-1596.
54. Soćko R. Nadtlenek wodoru. Dokumentacja dopuszczalnych wielkości narażenia zawodowego. *Podst Met Oceny Środ Pracy*, 2013, 1(75): 21-55.
55. Rogers JV, Sabourin CLK, Choi YW, et al. Decontamination assessment of *Bacillus anthracis*, *Bacillus subtilis*, and *Geobacillus stearothermophilus* spores on indoor surfaces using a hydrogen peroxide gas generator. *J Appl Microbiol* 2005, 99(4): 739-748.
56. Pottage T, Richardson C, Parks S, et al. Evaluation of hydrogen peroxide gaseous disinfection systems to decontaminate viruses. *J Hosp Infect* 2010, 74(1): 55-61.