

Piotr GRZYBOWSKI

e-mail: grzybowski@ichip.pw.edu.pl

Katedra Procesów Zintegrowanych, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Modelowanie poziomu stężenia bioaerozolu w centralnym systemie wentylacyjnym

Wstęp

Utrzymywanie centralnego systemu wentylacji/klimatyzacji w obiektach użytkowych obejmuje także pewną grupę zabiegów zapewniających właściwą pod względem czystości jakość powietrza. Obejmują one cykliczną wymianę filtrów powietrza oraz czyszczenie i dezynfekcję wnętrza kanałów wentylacyjnych. Zaniechanie tych czynności lub ich nierzetelne wykonywanie prowadzi do powolnego zanieczyszczenia się kanałów powietrznych, gromadzenia się w ich wnętrzu złożeń depozytów i rozwoju na nich mikroorganizmów. W powietrzu z zanieczyszczonych kanałów znajdują się cząstki bioaerozolowe, bakterie, zarodniki i strzępki grzybów. Poza dyskomfortem związanym z nieprzyjemnym zapachem, osoby narażone na długi kontakt z bioaerozolami mogą doświadczać tzw. *Syndromu Chorego Budynku*. Jest to grupa dolegliwości takich jak pieczenie oczu i gardła, nadmierna senność, częste infekcje, a także rozwijanie się astmy i nowotworów w rezultacie kontaktu z mykotoksynami. Umiejętność przewidywania dynamiki zmian stężenia bioaerozolu dostarczanego wraz z powietrzem do pomieszczeń użytkowych a zależnych od warunków eksploatacji systemu wentylacyjnego wydaje się być przydatna dla administratorów obiektów. Umożliwia ona właściwy dobór filtrów powietrza, zaplanowanie wymian tych filtrów oraz zabiegów sanitarnych. W pracy przedstawiono model obliczeniowy przydatny do tych celów.

Opis modelu matematycznego

W rozważaniach przyjęto, że kanał jest prostym cylindrem o średnicy D i długości L . Przepływa przez niego powietrze ze stałą prędkością U_0 . W powietrzu wlotowym są cząstki inerte, cząstki pożywki oraz cząstki bioaerozolu. Wszystkie one częściowo deponują na wewnętrznej powierzchni kanału tworząc warstwę depozytu. W warstwie depozytu rozwijają się grzyby mikroskopowe, które produkują zarodniki. Jedynie zarodniki mogą ulegać resuspensji do przepływającego powietrza. Lokalna grubość i skład warstwy depozytu ulega ciągłym zmianom. Zmianę stężenia cząstek inerte ($c = c_i$) i cząstek pożywki ($c = c_s$) powietrza opisuje ogólne równanie:

$$\frac{U_0 D}{4} \frac{dc}{dx} = \dot{V} c(x) \quad (1)$$

gdzie \dot{V} to szybkość osiadania cząstek na powierzchni ściany kanału. Zmianę stężenia cząstek bioaerozolu opisuje równanie (dla $c = c_B$):

$$\frac{U_0 D}{4} \frac{dc}{dx} = \dot{G} - \dot{V} c(x) \quad (2)$$

gdzie \dot{G} to szybkość resuspensji zarodników (cząstek bioaerozolowych) z wewnętrznej powierzchni kanału $\dot{G} = \eta_{res} c_{pow}$. Przyjęto dalej, że tak cząstki pożywki jak i cząstki inerte nie odrywają się już wtórnie od ścian kanału, tj. $\eta_{res} = 0$. Współczynnik skuteczności depozycji η_{dep} można określić na podstawie danych i modeli literaturowych [1]. Zmianę stężenia cząstek bioaerozolu wzdłuż kanału przedstawia rozwiązanie równania bilansowego uwzględniające szybkość generacji \dot{G} i szybkość depozycji \dot{V} . Penetracja cząstek bioaerozolu w kanał jest określana zależnością:

$$c(x) = \frac{\dot{G}}{\dot{V}} + \left(c_0 - \frac{\dot{G}}{\dot{V}} \right) \exp\left(-\frac{4x\dot{V}}{DU_0} \right) \quad (3)$$

Dla uproszczenia rozważań modelowych przyjęto, że jedyne cząstki bioaerozolu to cząstki zarodników wytwarzane przez rozwijające się na podłożu kolonie grzybów mikroskopowych. Zanim zostaną oderwane z podłoża tworzą populację zarodników w podłożu i stanowią w podłożu określony ułamek rozwijającej się tam biomasy grzybów i opisywaną stężeniem powierzchniowym c_{pow} . Równanie bilansu powierzchniowego stężenia cząstek bioaerozolu:

$$\frac{dc_{pow}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_z}{Fh} \right) = \dot{P}Fh + \dot{V}cF - \eta_z \dot{P}Fh + -K_{zc_{osad}}Fh - \frac{m_z}{Fh^2} \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

W równaniu tym P to szybkość generacji zarodników w osadzie o lokalnej grubości h na lokalnej powierzchni osadu F , \dot{V} to szybkość depozycji zarodników η_z – ułamek powstających nowych zarodników które ulegają oderwaniu i przechodzą do strumienia powietrza, K_z to szybkość przekształcania zarodników w osadzie w plechę grzyba. Szybkość P oblicza się z zależności *Monoda*.

$$\dot{P} = \theta \frac{dX}{dt} = \theta X \mu_{max} \frac{S}{S + K_S} \quad (5)$$

gdzie θ to ułamek przyrastającej biomasy plechy grzyba przekształcanej w zarodniki a S to stężenie pożywki w osadzie. Występującą w (4) szybkość zmiany lokalnej grubości osadu dh/dt określa się z następującej zależności:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} = & \dot{V}c_s F \frac{1}{\rho_s \epsilon_{osad}} \frac{1}{F} + \dot{V} \frac{1}{\rho_{osad} \epsilon_{osad}} \frac{1}{F} + \\ & - (1 - \varphi_{X(S)}) \frac{dX}{dt} Fh \frac{1}{\rho_s \epsilon_{osad}} \frac{1}{F} - \eta \theta \frac{dX}{dt} Fh \frac{1}{\rho_{zar} \epsilon_{osad}} \frac{1}{F} + \\ & + \dot{V}c_l F \frac{1}{\rho_l \epsilon_{osad}} \frac{1}{F} \end{aligned} \quad (6)$$

W (6) kolejne wyrażenia to: szybkość przyrostu grubości osadu w związku z opadaniem cząstek pożywki, z opadania zarodników, na skutek ubytku pożywki w osadzie, resuspensji wytwarzanych zarodników i z docierających do osadu cząstek inerte.

Szybkość wzrostu biomasy opisana jest równaniem:

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \frac{1}{X} r_x = \mu(X, S) \quad (7)$$

gdzie:

$r_x = \mu(X, S)X$ – rzeczywista szybkość wzrostu,
 X – stężenie biomasy (masy plechy) w pożywce,
 μ – właściwa szybkość wzrostu plechy.

Przyjęto dalej, że plecha rozwija się zgodnie z kinetyką wzrostu *Monoda*, według równania:

$$\mu(X, S) = \mu_{max} \frac{S}{K + S} \quad (8)$$

gdzie:

μ – właściwa szybkość wzrostu plechy
 μ_{max} – maksymalna właściwa szybkość wzrostu plechy
 K – stała nasycenia
 S – stężenie pożywki

Rozprzestrzenianie się pleśni odbywa się jedynie w płaszczyźnie ścianki kanału. W miarę ubytku składników pożywki S , następuje obumieranie plechy, zgodnie z zależnością:

$$\frac{1}{X} \frac{dX}{dt} = \mu_L \quad (9)$$

gdzie: X_L – stężenie martwej materii plechy.

Szybkość właściwa obumierania plechy dana jest zależnością *Humphrey'a* [2]:

$$\mu_L = \mu_{Lmax} \left(1 - \frac{S}{K_L + S} \right) \quad (10)$$

gdzie:

μ_L – właściwa szybkość zamierania plechy,

μ_{Lmax} – maksymalna właściwa szybkość zamierania plechy, w warunkach całkowitego wyczerpania się pożywki (S_0),

K_L – stała zamierania.

Obumarła plecha nie staje się pożywką, pozostaje w układzie i nie podlega dalszym przemianom.

Dodatkowo, żywa pleśń jest zdolna do wytwarzania zarodników. Produkcja zarodników rozpoczyna się, gdy lokalna plecha osiągnie, przyjęty tu arbitralnie, wiek 3 dni:

$$\frac{dZ}{dt} = \theta \frac{dX}{dt} \quad \text{dla } t \geq 3 \text{ dni} \quad (11)$$

$$\frac{dZ}{dt} = 0 \quad \text{dla } t < 3 \text{ dni} \quad (12)$$

Szybkość produkcji zarodników jest związana z naturalną szybkością wzrostu plechy dX/dt i przyjęto, że masa zarodników stanowi 1% aktualnie i lokalnie przrastającej masy plechy.

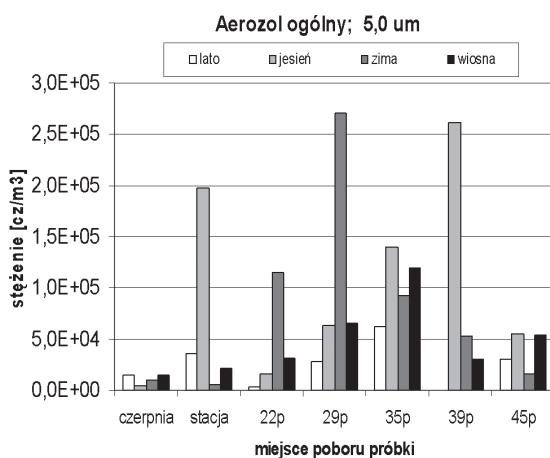
Przyjęto ponadto, że współczynnik wydajności biomasy względem substratu wynosi $\varphi_{x/s} = 0,6$.

$$\varphi_{x/s} = - \frac{dX}{dS} \Rightarrow dS = - \varphi_{x/s} dX \quad (13)$$

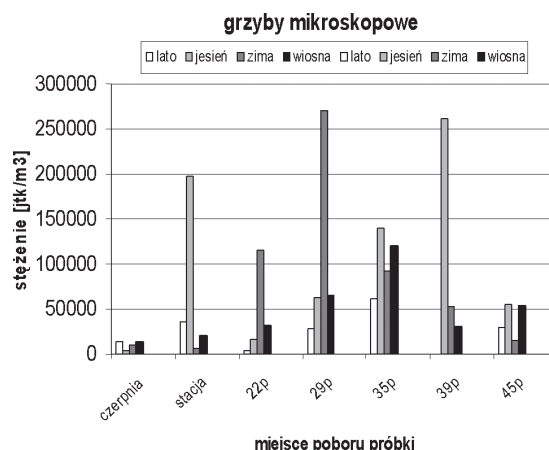
Model jest niezwykle złożony i do jego wykorzystania w konkretnym obiekcie potrzebne są wartości liczbowe parametrów charakteryzujących kinetykę wzrostu lokalnie zasiedlających go mikroorganizmów. Ponadto model zakłada stabilne warunki wilgotności i temperatury powietrza, które wpływają na dynamikę rozwoju plechy.

Wyniki pomiarów w obiektach

W ramach Uczelnianego Projektu Badawczego na *Politechnice Warszawskiej* projektów badawczych prowadzono na przełomie 2008/2009 pomiary stężenia żywego bioaerozolu w powietrzu w jednym z wybranych wieżowców z zamiarem podjęcia próby opisu zależności stężenia od czasu i długości drogi kanału powietrznego. Pomiary przeprowadzono wzdłuż pionowego kanału wentylacyjnego na całej wysokości budynku zasilanej powietrzem z tego kanału.



Rys. 1. Wyniki pomiarów stężenia cząstek aerozolu ogólnego w przedziale 5 µm



Rys. 2. Wyniki pomiarów stężenia cząstek bioaerozolu grzybów mikroskopowych

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych pomiarów sugerują w oczywisty sposób, że w badanym kanale wentylacyjnym w zalegającej w nim warstwie depozytu rozwijają się mikroorganizmy produkujące strumień netto bioaerozolu. Świadczy o tym charakterystyka wahań stężenia aerozolu ogólnego 5 µm oraz wielokrotne wykrywanie wyższego stężenia bioaerozolu w dalszych odcinkach tego samego kanału wentylacyjnego niż w powietrzu wlotowym (czerpnia). Praktyczne wykorzystanie zaprezentowanego modelu matematycznego może nie być łatwe ze względu na brak ścisłych danych, co do składu i rozłożenia depozytu wewnątrz kanału, braku odrębnych badań mikrobiologicznych nad wzrostem grzybów mikroskopowych w warstwach depozytu umożliwiającym oszacowanie tempa produkcji zarodników a przez to tempa wtórnej kontaminacji powietrza przepływającego kanałem. Zaprezentowany model obliczeniowy umożliwia jednak oszacowanie szybkości wewnętrznego zanieczyszczania się kanału oraz związany z tym, na tyle wiernie na ile przyjmie się zbliżone do rzeczywistych parametry kinetyczne modelu, wzrost wtórnej kontaminacji powietrza bioaerozolem. Dodatkową trudnością w aplikacji jest duże sezonowe wahanie składu oraz stężenia aerozolu w powietrzu zewnętrznym. Trudno ustalić ściśle strumień materiału organicznego wprowadzanego do kanału wentylacyjnego wraz z powietrzem jak i w dalszej kolejności warunki jego depozycji oraz kreowanie środowiska odpowiedniego do rozwoju grzybów mikroskopowych i bakterii. W rzeczywistych instalacjach wentylacyjnych obserwuje się też często wahania wilgotności płynącego w nich powietrza. Wahania wilgotności przekładają się na przyspieszanie, spowalnianie czy wręcz okresowe hamowanie rozwoju mikroorganizmów. W przeciwieństwie do hamowania wzrostu mikroorganizmów w suchym powietrzu, resuspensja bioaerozolu może w takich okolicznościach rosnąć gdyż przesychnięte kolonie grzybów wtedy głównie uwalniają zarodniki i strzępki. Ścisłe i ogólne uwzględnienie w modelu całej i złożonej biologii rozwoju nawet jednego gatunku mikroorganizmu wydaje się niemożliwe a w rzeczywistych układach obserwuje się współwystępowanie różnych gatunków mikroorganizmów. W praktyce jesteśmy zmuszeni do stosowania bardzo licznych uproszczeń i założeń w próbach modelowania dynamiki kolonizowania układów wentylacyjnych mikroorganizmami i wytwarzaniu przez nie wtórnego bioaerozolu.

LITERATURA

- [1] M. R. Sippola: Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 2002.
- [2] F. Bergter: Wachstum von Microorganismen VEB G. Fisher Verlag Jena (GDR), 1972.